SZIKKTI

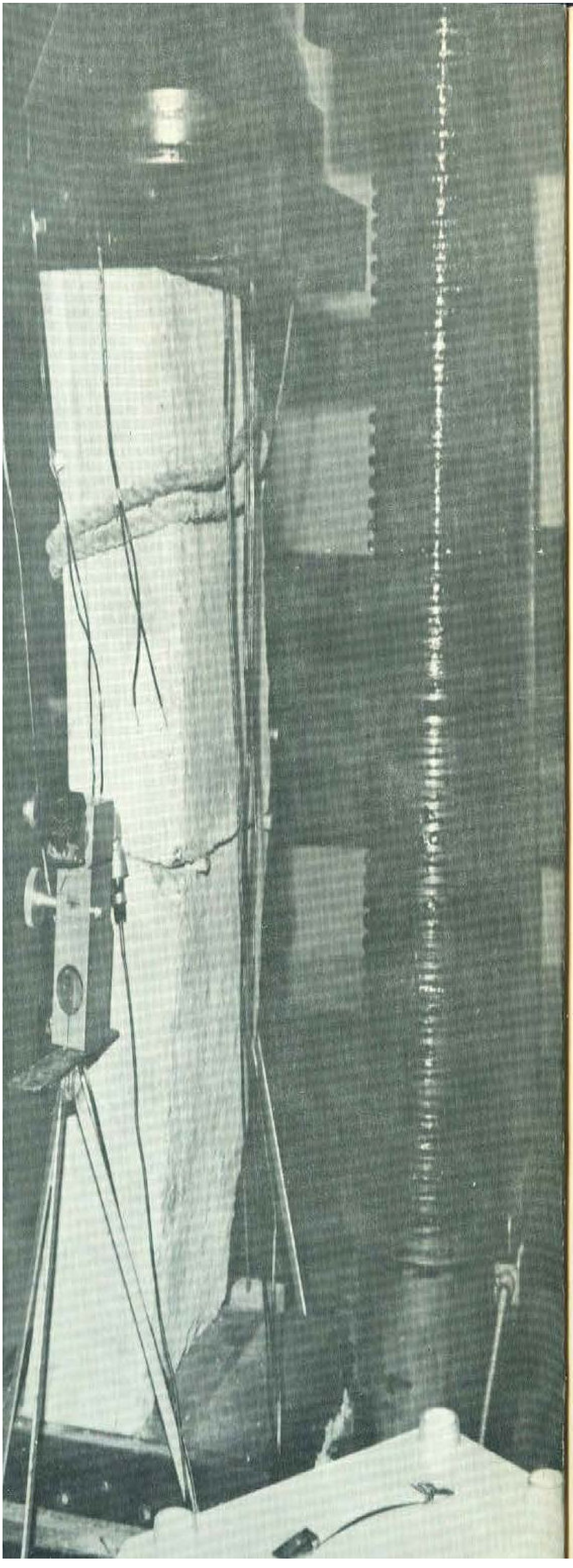
TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Dombi József

Építőanyagok szilárdsága és szilárdságvizsgálata

1. Nyomószilárdság

61



SZILIKÁTIPARI KÖZPONTI KUTATÓ
ÉS TERVEZŐ INTÉZET

TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Dombi József

Építőanyagok szilárdsága és szilárdságvizsgálata

1. Nyomószilárdság

Dr Kausay Tibornak
barátsággal és tisztelettel
Szerző

61

Budapest, SZIKKTI, 1979

SZILIKÁTIPARI KÖZPONTI KUTATÓ ÉS TERVEZŐ INTÉZET
Budapest III., Bécsi út 126.
Postai cím: Budapest, Pf 112 H–1300

A kiadvány a Budapesti Műszaki Egyetem Mémöktovábbképző Intézetének 1978. évi Betontechnológusképző tanfolyamán elhangzott előadás anyagát is tartalmazza

Lektorok:
Dr. Balázs György
tanszékvezető egyetemi docens
Dr. Erdélyi Attila
egyetemi adjunktus

ISSN 0133–3372
ISBN 963 7111 12 3

ELŐSZÓ

Szilikátbázisú anyagaink legnagyobb részét építőanyagként építmények és épületek létrehozásához használják fel. Az építőanyagok nagyon fontos – talán legfontosabb – jellemzője a mechanikai igénybevételekkel szembeni ellenálló képesség: a szilárdság.

A szilikátipari technológiák fejlődése, új anyagok alkalmazása, a kutatási eredmények építőipari hasznosítása egyaránt indokolta, hogy az ismert úton tovább kellett lépni, hogy a felvetődött kérdésekre pontos választ tudjunk adni. Ez irányban tett erőfeszítéseink, kutatásaink és vizsgálataink eredményeit adjuk közre e füzetünkben, melyhez kapcsolódóan további kiadványban jelentetjük meg az építőanyagok húzószilárdságának és a hajlítószilárdságának tárgyában végzett kutatásaink eredményét.

Budapest, 1978. április

Dr. Talabér József
igazgató
egyetemi tanár

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó 3
1. Bevezetés 7
2. Az anyagok nyomószilárdságának fogalma 9
3. Az anyagok nyomószilárdság-vizsgálatának geometriai feltételei 25
   3.1 Próbatest geometria 25
   3.2 A próbatest elhelyezkedésének geometriai feltétele 31
4. Vizsgálati feltételek és az anyagok nyomószilárdságának összefüggései 38
5. Az elméletileg és kísérletileg meghatározott feltételek alkalmazása ipari kísérletek és vizsgálatok során 71
   5.1 A mészkő nyomószilárdság vizsgálata 71
   5.2 A csőbeton nyomószilárdság vizsgálata 72
   5.3 Házgyári panelok szilárdságvizsgálata 78
   5.4 Korund próbatestek szilárdságvizsgálata 81
6. Összefoglalás 83
   Summary 85
   Zusammenfassung 87
   Résumé 89
   Резюме 91
7. Irodalomjegyzék 93

1. BEVEZETÉS

Az építési módok és az építőipari technológiák rohamos fejlődése egyre nagyobb igényeket támaszt az építőanyagokkal szemben. Az egyre fokozódó mennyiségi igényeken kívül megfigyelhető a minőségi igény növekedése az építőanyagokkal szemben, valamint az építményekben elfoglalt helyzetük szerinti funkcionális differenciálódás. Egyre jobban elkülönülnek és fejlődnek az ún. teherhordó szerkezetek anyagai. Az elmúlt évtizedekben kialakult, illetve egyre fokozottabb jelentőséget kapott az önálló szerkezeti funkciót betöltő anyagok alkalmazása (pl. hőszigetelő, hangszigetelő, rezgéscsillapító, nedvességszigetelő stb.). Új anyagok alkalmazására is sor került az építőipar területén, elsősorban a műanyagok.

Egyfelől tehát az anyagokkal szemben folytonosan növekvő igényeket tapasztalhatunk, mely igényeknek legnagyobb hányada az anyagok mechanikai tulajdonságaira vonatkozik, illetve arra vezethető vissza.

Az építőanyagipar nagymérvű fejlesztése számtalan új anyag építőipari alkalmazását tette lehetővé. Ezen túlmenően a már régóta ismert és alkalmazott anyagok tulajdonságai is jelentős mértékben megváltoztak a korszerű gyártástechnológia eredményeképpen. Az új gyártási módok az építőanyagoknak nemcsak a szilárdságát növelték, hanem törvényszerű velejárójaként fokozták az anyagok ridegségét, tehát változást idéztek elő rugalmassági tulajdonságaikban is.

Másfelől tehát az anyaggyártó technológiák fejlődésével és korszerűsítésével a már ismert anyagok pl.: tégla, csempe, beton, nagyszil. acélok mechanikai tulajdonságai jelentős mértékben megváltoztak, az új anyagok mechanikai tulajdonságai pedig meghatározásra várnak.

E két alapvető ipari igény, illetve feltétel mellé felsorolható még az a körülmény is, hogy az anyagkutatás – új összetétel, technológia, különleges kezelés stb. – eredményeinek legnagyobb része csak a mechanikai tulajdonságok pontos ismeretével „közvetíthető" az építőipari felhasználás céljára.

Jelen helyzetünkben megállapithatjuk, hogy az előzőekben felsorolt ipari és tudományos igényeknek a mai – szokásos – mechanikai anyagvizsgálati kutatás és gyakorlat nem tud megfelelni. Ezt a megállapításunkat nemcsak a hazai körülményekre értelmezzük, mert tapasztalatunk szerint más országokban, ha eltérő mértékben is, de alapvetően azonos problémákkal küszködnek.

Hazánkban a mechanikai anyagvizsgálati kutatás nagy és tiszteletet ébresztő múltra tekint vissza. E tudományterületen csupán az utóbbi évtizedekben olyan iskolát teremtő nagy egyéniségeket mondhatunk magunkénak, mint Zielinsky, Mihailich, Palotás. Munkájuk eredményeképpen az anyagvizsgálati elmélet is a nemzetközi élvonalba tartozott és megfelelő válaszokat tudott adni az ipar által felvetett problémákra. Ma azonban nem ez a helyzet. Az anyagkutatás lemaradt az ipari fejlődéstől és a tudomány egyéb területein elért eredményektől. Az új építőanyagok mechanikai tulajdonságaihoz a vizsgálati módszereink érzékenysége nem megfelelő; felborult a vizsgálandó anyag és a vizsgálati mód korábban kialakított helyes aránya.

Ezekből a felismerésekből kiindúlva intézetünkben az elméleti kutatómunkát és az anyagvizsgálati gyakorlatot egyaránt annak szolgálatába kívántuk állítani, hogy e helyzeten változtatni tudjunk és az anyagvizsgálat terén tapasztalható elmaradást csökkentsük, esetleg megszüntessük.

Jelen közleményünk e tárgykörben tizenöt évet felölelő elméleti kutató és vizsgálati gyakorlati munka eredményéről számol be és azt foglalja össze. A téma – jellegéből adódóan – sok vesződséget, gondosságot és hosszútávú ragaszkodást igényel a kutatótól épp oly mértékben, mint a kísérletek végrehajtásában döntő szerepet játszó laboránstól.

Ezúton köszönöm meg Kochanek Zoltánné kartásnőnek e témakörben tizenöt éven át végzett rendkívül pontos és gondos munkáját. Mint a témában egyedüli segítő munkatársam, nagymértékben járult hozzá az eddig elért eredményekhez.

2. AZ ANYAGOK NYOMÓSZILÁRDSÁGÁNAK FOGALMA

Az építőanyagok a megvalósult objektumokban sokféle külső terhelő erőknek, mozgásoknak vannak kitéve. Az ezekből származó igénybevételt összefoglalóan „mechanikai igénybevételnek" nevezzük.

Szilárdságtani feladat, hogy a szilárd testekre ható külső erők és mozgások, valamint ennek alapján létrejött belső erők és alakváltozások közötti összefüggést meghatározzuk. Ezt a feladatot csak az anyagok szilárdságtani tulajdonságainak ismeretében lehet megoldani. Az elméleti szilárdságtan ezért igényli és feltételezi az anyagok tulajdonságainak jó és egyszerű definiálhatóságát.
Ennek alapján megfogalmazva: az anyagok szilárdsági tulajdonságain azokat a tulajdonságokat értjük, amelyek a mechanikai igénybevételekkel szemben tanusított ellenállásuk szempontjából jellemzik.

Az anyagok szilárdsági jellemzőinek meghatározása során feltételezünk bizonyos idealizálásokat, egyszerűsítéseket, melyek lehetővé teszik a jól kezelhető matematikai összefüggések felállítását.

A terhelő erőkből és mozgásokból belső erők és alakváltozások származnak. A test egységnyi felületére jutó belső erőt feszültségnek (p) nevezzük. Határátmenettel:

$$\vec{p} = \lim_{A \to o} \frac{F}{A}$$

A feszültség vektormennyiség. A feszültségvektornak a szóban forgó felületelem normálisa menti vetülete a normálfeszültség (σ húzó- vagy nyomófeszültség) a felületelem síkjába eső, sík menti vetülete a tangenciális feszültség, τ nyíró, csúsztató feszültség, azaz:

A szilárdságtan egyszerű- és ezek bizonyos összességéből álló összetett igénybevételt ismer.

A szilárdságtan egyszerű igénybevételei: húzás, nyomás, közös néven normál-igénybevétel, amikor az egyenes tengelyű, állandó keresztmetszetű prizmatikus vagy hengeres rúd végkeresztmetszeteire egyenletesen megoszló és a rúdtengellyel párhuzamos külső erők hatnak, melyek eredője a tengelybe eső F erő és az egyenértékű bármely keresztmetszetre nézve az arra működő belső erők eredőjével, az N normálerővel; a fellépő feszültségek normálfeszültségek (σ).

A normál-igénybevétel okozta normálfeszültség a rugalmasságtan alapfeltevéseinek megfelelően a

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

képlettel számítható, ahol F a normálerő (N), A a vizsgált keresztmetszet területe (mm^2).

A szilárdsági vizsgálatok célja az anyagok szilárdsági és azokkal szorosan összefüggő alakváltozási jellemzőinek megállapítása.

A terhelőerők jellegének megfelelően az építőanyagok szilárdsági tulajdonságainak megfelelően megkülönböztetnek:

- statikus vizsgálatokat, melyeknél a terhelés fokozatosan növekvő módon és nem lökésszerűen, rövid idő alatt ér el egy meghatározott értéket;
- tartós vizsgálatokat, amelyeknél a statikus jellegűen bizonyos értékig felnövekvő teher hosszú ideig, esetleg évekig általában változatlanúl működik;
- változó terhelésű (ún. fárasztó) vizsgálatokat, amelyeknél a terhelés statikus jellegűen ugyan, de folytonos megterhelés és tehermentesítés, esetleg ellenkező előjelű terhelés mellett nagyon sokszor ismétlődve működik;
- dinamikus vizsgálatokat, amelyeknél a terhelést lökés-ütésszerűen működtetjük.

Az egyes terhelési módoknak megfelelően ismerünk statikus szilárdságot, tartós szilárdságot, kifáradási szilárdságot, ütőszilárdságot.

A vizsgálatok – a mechanikai igénybevételektől függően – lehetnek:

húzóvizsgálatok,
nyomóvizsgálatok,
hajlítóvizsgálatok,
nyíróvizsgálatok,
csavaróvizsgálatok.

Az egyes vizsgálatoknak megfelelően beszélhetünk húzó-, nyomó-, hajlító-, nyíró- és csavarószilárdságról.

Ezek után megfogalmazhatjuk a szilárdság fogalmát:

> *„Szilárdságon a feszültségnek azt a legnagyobb értékét, illetve határértékét értjük, amely mellett az anyag tönkremegy, illetve amelyet az anyag a törést közvetlenül megelőző szilárdsági határállapotban még éppen elbír. A szilárdság – ebben az értelemben – tönkretevő feszültség vagy törőfeszültség".*

A terhelés következménye az anyagi test alakváltozása. Így a tönkremenetelt magát – az anyagfajtától függően – bizonyos jellemző alakváltozások kísérik. A tönkremenetelt egységnyi hosszúra vonatkoztatott „fajlagos törési alakváltozással" is lehet – és szokták – jellemezni.

A feszültség és szilárdság fogalmát, melyet a rugalmasságtani illetve szilárdságtani meghatározásainknál alapul vesszük, tulajdonképpen egy átlagos feszültség, amelyet véges nagyságú próbatestek, véges felületek alapján határozunk meg. Ezt a fogalmat – mivel a technikai gyakorlat használja – *„technikai feszültségnek"*, illetve *„technikai szilárdságnak"* nevezzük.

Ismeretes még a *„mikroszilárdság"* és a *„teoretikus szilárdság"* fogalma.

„Teoretikus szilárdságon" értjük azt a feszültségi határértéket, melyet számítással határozunk meg azon vonzó- és taszítóerők figyelembevételével, melyek az egyes atomok között működnek. Kiszámítjuk azt a teoretikus erőt, amely szükséges ahhoz, hogy az elemi testben – kristályban, illetve atom- vagy molekulacsoportban – minden atom egyidejűleg egy csúszósíkon eltolódjék az elcsúszó atomsorral szomszédos síkokba. Az így kiszámított értékek több száz, sőt több ezerszeresei is lehetnek a mikroszilárdsági értékeknek.

„Mikroszilárdság" fogalmán értjük az anyag differenciálisan kicsiny, molekuláris méreteket megközelítő elemei alapján megállapított feszültségi határértéket. A megfigyelések szerint a „technikai szilárdság" és a „mikroszilárdság" értékek között nagymértékű, tíz- illetve százszoros eltérés is lehet.

A „mikroszilárdság" fogalma és értékeinek jelentősége – a szálas anyagok elterjedésével – az építőiparban nagymértékben növekszik.

Ezen fogalmak tárgyalása jelenleg nem tartozik a kitűzött és kutatandó céljaink közé, így jelen közleményünkben nem foglalkozunk velük.

A szilárdság fogalmának meghatározásakor idézzük fel a legismeretesebb törési elméleteket.

Egy pont feszültségi, illetve alakváltozás állapotát a főtengelyek menti főfeszültségekkel, illetve főnyúlásokkal jellemezni tudjuk. Egytengelyű igénybevétel esetén (húzás, nyomás, hajlítás) a feladat a számított feszültségeknek, az anyagjellemzők adta értékekkel való összehasonlításával megoldottnak tekinthető.

Arra a kérdésre, hogy különböző nem lineáris feszültség állapotokra nézve mi legyen a megengedhető feszültség, mikor lehet összetett igénybevételeket egyenértékűnek mondani, a különböző törési elméletek, kísérletek feleletet adnak. Ezek alapgondolata, hogy a feszültségállapot jellemzői (a három főfeszültség vagy a hat feszültségi komponens) alapján egyetlen mértékadónak elfogadható, képzelt, nem létező feszültségértéket, az ún. ideális vagy redukált feszültséget (σ_r) meg lehet állapítani, amely egyirányú igénybevétel alapján kísérleti értékkel (σ_m; τ_m) összehasonlítható. A törési elméletek szerint tehát két feszültségi állapotot egyenértékűnek lehet mondani akkor, ha a számított redukált feszültség azonos.

a) A legnagyobb főfeszültségek elmélete szerint (Galilei, Lame, Clapeyron, Rankine) a test valamely helyén a törés azért következik be, mert a maximális feszültség meghalad egy, az anyag minőségét jellemző tapasztalati értéket. Bevezetve az anyagra megengedhető σ_m értéket és a legnagyobb számított feszültség értéket $\sigma_r = \sigma_{max}$, arról gondoskodunk, hogy $\sigma_{max} \leqq \sigma_m$, ahol σ_{max} a σ_1; σ_2; σ_3 főfeszültségek legnagyobbika. Az elmélet hiányossága, hogy nyírásra ugyanakkora feszültséget enged meg, mint húzásra, és ez a minden oldali nyomásra végtelen értékű lehetne.

b) A legnagyobb hosszváltozás elmélete (Mariotte, Poncelet, De St. Venant) szerint az anyag azért megy tönkre (folyik, szakad, törik), mert az előforduló legnagyobb fajlagos hosszváltozás túllépi az anyag szilárdsági tulajdonságai által megsza-

bott tapasztalati értéket. Azt kellene elérni, hogy a test minden pontjában kisebb vagy egyenlő legyen a fajlagos hosszváltozás ($\epsilon_r = \epsilon_{max}$), mint a megengedett ($\epsilon_m$): $\epsilon_{max} \leqq \epsilon_m$.

A Hooke-törvénynek engedelmeskedő anyagok esetén a főnyúlások és a főfeszültségek közötti összefüggés alapján, áttérhetünk itt is a redukált feszültség értékére:

$$E \cdot \epsilon_{max} \leqq E \cdot \epsilon_m \text{ azaz } \sigma_r = \sigma_{max} \leqq \sigma_m.$$

Három redukált feszültségről lehet szó:

$$\sigma_r = \sigma_1 - \frac{1}{m}(\sigma_2 + \sigma_3); \sigma_r = \sigma_2 - \frac{1}{m}(\sigma_3 + \sigma_1);$$

$$\sigma_r^m = \sigma_3 - \frac{1}{m}(\sigma_1 + \sigma_2);$$

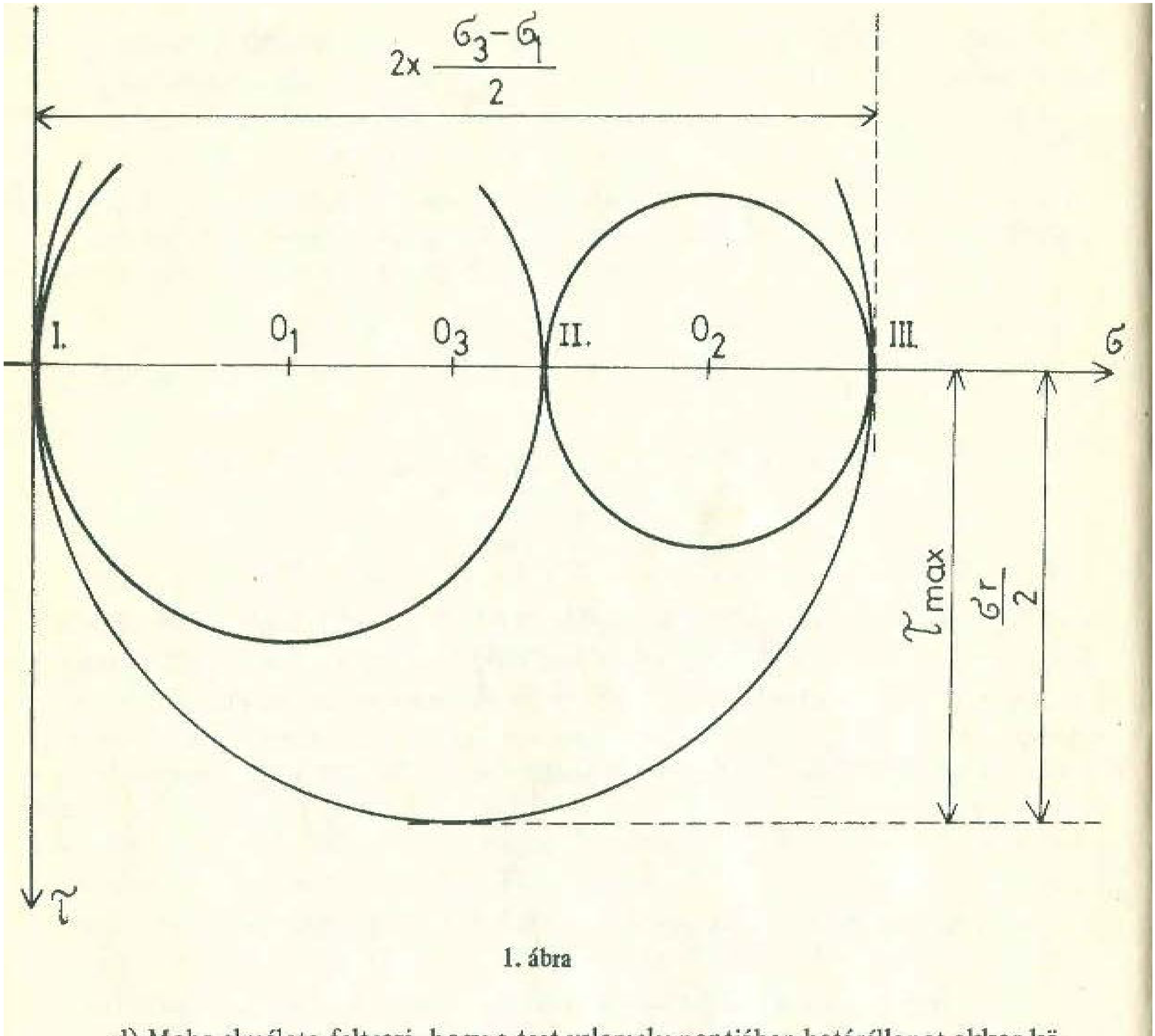
azaz a három redukált feszültség legnagyobbika kisebb vagy egyenlő legyen, mint a megengedett feszültség. Itt a redukált feszültség ama képzelt feszültséget jelenti, amelynek az illető főirányban hatni kellene, hogy leneáris feszültségállapot esetén önmagában ugyanazt az ϵ nyúlást idézze elő, mint amely a tényleges feszültségi állapotban fellép. Ez az elmélet a kísérleti tényekhez viszonyítva túl nagy τ feszültséget enged meg:

$$\tau_m = \frac{m}{m+1} \cdot \sigma_m$$

Pl.: vasanyagoknál $m = \frac{10}{3}$ érték esetén $\tau_m = 0{,}77\,\sigma_m$ a kísérleti érték $\tau_m = 0{,}5\,\sigma_m$.

c) A legnagyobb nyírófeszültségek elmélete (Coulomb, Guest, Bauschinger, Föppl) szerint a törés beálltára az anyagban fellépő legnagyobb csúsztatófeszültség (τ_{max}) mértékadó.

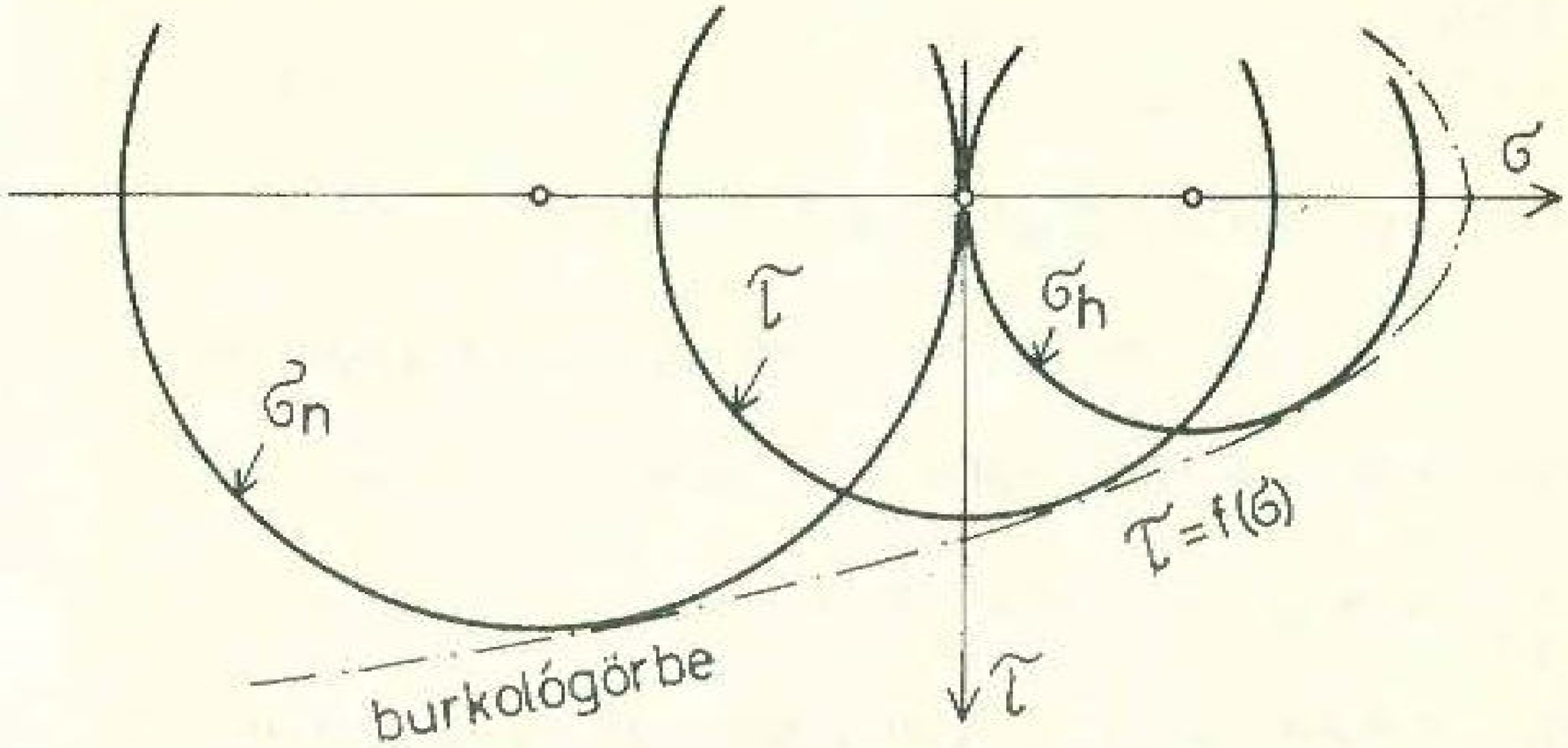
Mivel $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ esetén $\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)$, az összetett igénybevételt egyetlen σ_r feszültség helyettesíti a folyás vagy törés állapotában $\tau_{max} = \frac{\sigma_r - 0}{2} = \frac{\sigma_r}{2}$, azaz $\sigma_r = \sigma_3 - \sigma_1 = 2\tau_{max} \leqq \sigma_m$; tehát a közepes főfeszültségnek (σ_r) a törésre nincs befolyása *(1. ábra)*.



1. ábra

d) Mohr elmélete felteszi, hogy a test valamely pontjában határállapot akkor következik be, amikor az illető ponton átmenő meghatározott felületelemek a „csúszólapok" mentén az anyagrészecskék elcsúsznak, amikor tehát a csúsztatófeszültség aránylag nagy. A csúszás azonban nem azért következik be, mert a csúszóoszlopok mentén a σ vagy τ feszültség önmagában véve elér egy bizonyos határértéket, hanem azért, mert a feszültségállapot az anyagra jellemző $\tau = f(\sigma)$ összefüggéssel megszabott határt elérte.

Ez az összefüggés a különböző igénybevételi módokra kísérletileg állapítandó meg. Minden fajta igénybevétel esetén megállapítjuk a megfelelő szilárdsági határállapotot (vagy a rugalmassági,vagy a törést előidéző állapotot), amelyet a Mohr-féle ábrázolásban egy-egy főkörrel jellemzünk. Ezeknek a határállapotnak megfelelő főköröknek burkoló görbéje a Mohr-féle határgörbe. Az érintési pontok az illető igénybevételhez tartozó határállapot csúszólapjaiban ébredő csúsztatófeszültségek pontjai. A középső feszültségnek tehát szerepe itt nincs *(2. ábra)*.

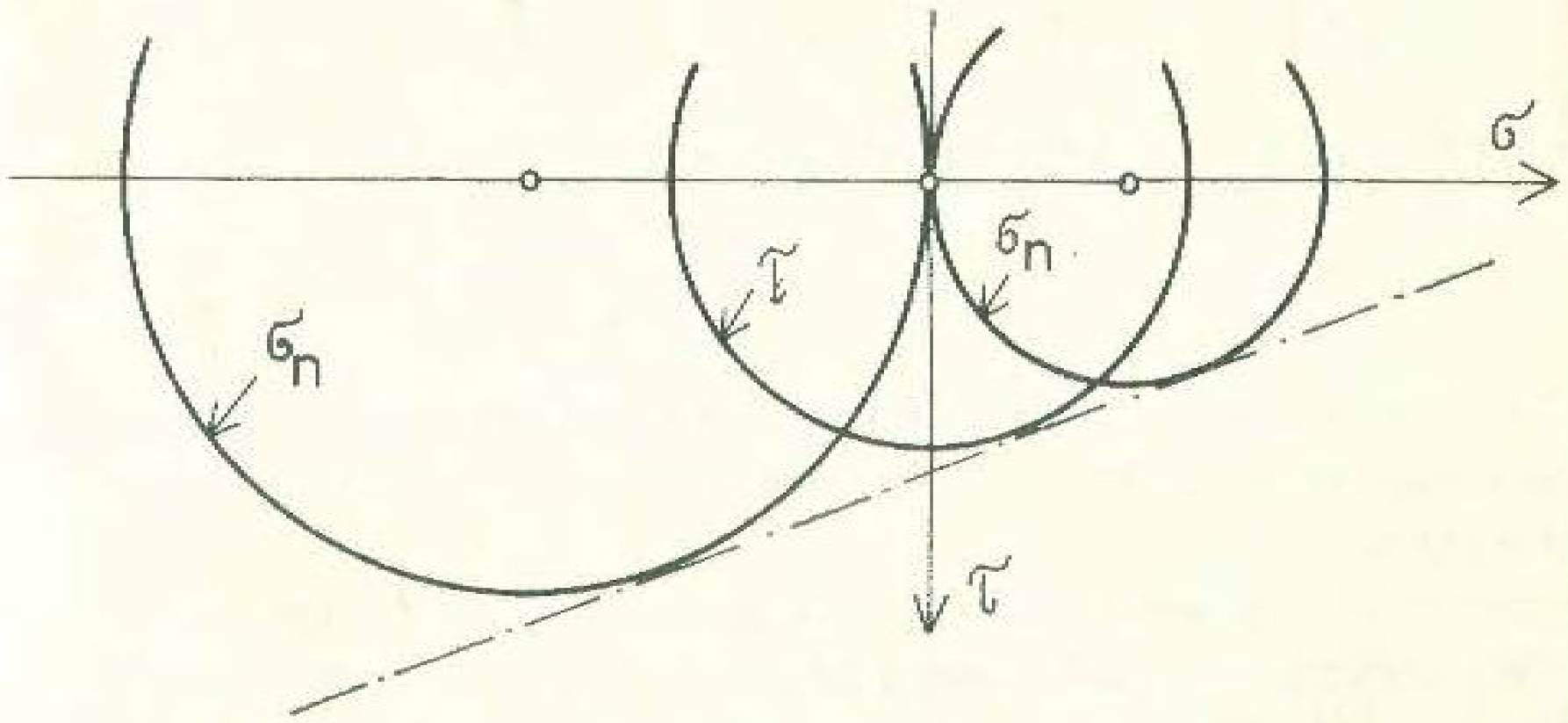


2. ábra

Ha tiszta nyomásra (σ_n) és húzásra (σ_n) vonatkozó főkörök burkoló görbéjét egyenesnek vesszük fel, a tiszta nyírással szembeni anyagszilárdságot a *3. ábra* szerint a

$$\tau = \frac{\sigma_n \cdot \sigma_n}{\sigma_n + \sigma_n}$$

összefüggés adja. Ha $(\sigma_n) = (\sigma_n)$, akkor $T = 0{,}5\ \sigma_n$; mint a legnagyobb nyírások elméleténél.



3. ábra

e) A fajlagos alakváltozási munka elmélete szerint (Beltrami), ama fajlagos teljes alakváltozási munka (λ), amely mellett az anyag a szilárdsági határállapotot eléri, független az igénybevétel fajtájától. Ezen elmélet szerint a törés akkor következik be, amikor a λ egy bizonyos λ_o határértéket elért. Ez a λ_o határérték kísérletileg pl. valamely egyirányú igénybevétel esetére (húzásra, nyomásra) határozandó meg. Ha ennek megengedett értéke

$$\lambda_{\bigcirc} = \frac{\sigma^2_{\bigcirc}}{2E}$$

és a szóban forgó feszültségi állapothoz tartozó értéke

$$\lambda = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \frac{2}{m}(\sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_3 \cdot \sigma_1 + \sigma_1 \cdot \sigma_2)]$$

a feszültségi feltétel tetszőleges igénybevételi módra $\lambda \leqq \lambda_{\bigcirc}$, azaz

$$\sigma_r^2 = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \frac{2}{m}(\sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_3 \cdot \sigma_1 + \sigma_1 \cdot \sigma_2)] \leqq \sigma^2_{\bigcirc}.$$

f) A fajlagos „tiszta" alakváltozási munka elmélete (Huber-Mises-Hencky) szerint két feszültségi állapot akkor tekinthető egyenértékűnek, ha a tiszta alakváltozási munka — tehát térfogatváltozási fajlagos munkától eltekintve — azonos. A teljes alakváltozási munkából a térfogatváltozásra eső munkát levonva, a megengedhető tapasztalati $\lambda_{\bigcirc}$ érték:

$$\lambda_{\bigcirc} = \frac{1+m}{m} \cdot \frac{2\sigma^2_{\bigcirc}}{6E} \text{ és}$$

$$\lambda = \frac{1+m}{m} \cdot \frac{1}{6E}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2],$$

azaz $\lambda \leqq \lambda_{\bigcirc}$, illetve

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] < \sigma^2_{\bigcirc},$$

valamint tetszőleges ismert hat feszültségi komponens esetén:

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_z + \tau_x^2)]$$

A továbbiakban — eredeti szándékunknak megfelelően — az anyagok szilárdsági tulajdonságainak meghatározását leszűkítjük a nyomószilárdság fogalmára és annak vizsgálatára.

Az anyagok nyomószilárdságát az egyenes tengelyű rudak egyszerű igénybevételével határozzuk meg. Az alábbiakban felidézzük az egyenes tengelyű állandó keresztmetszetű prizmatikus vagy hengeres rúd normál igénybevételét:

„A végkeresztmetszetekre ható külső erők (F), valamint egy közbenső tetszőleges keresztmetszetre ható — a külső erővel egyenértékű — belső normálerő (N) okozta fajlagos igénybevétel, a keresztmetszetre merőleges normálfeszültség (σ)":

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

A Hooke- törvénynek engedelmeskedő anyagból levő rúd fajlagos hosszváltozása (ϵ), illetve teljes hosszváltozása ($\Delta\ell$):

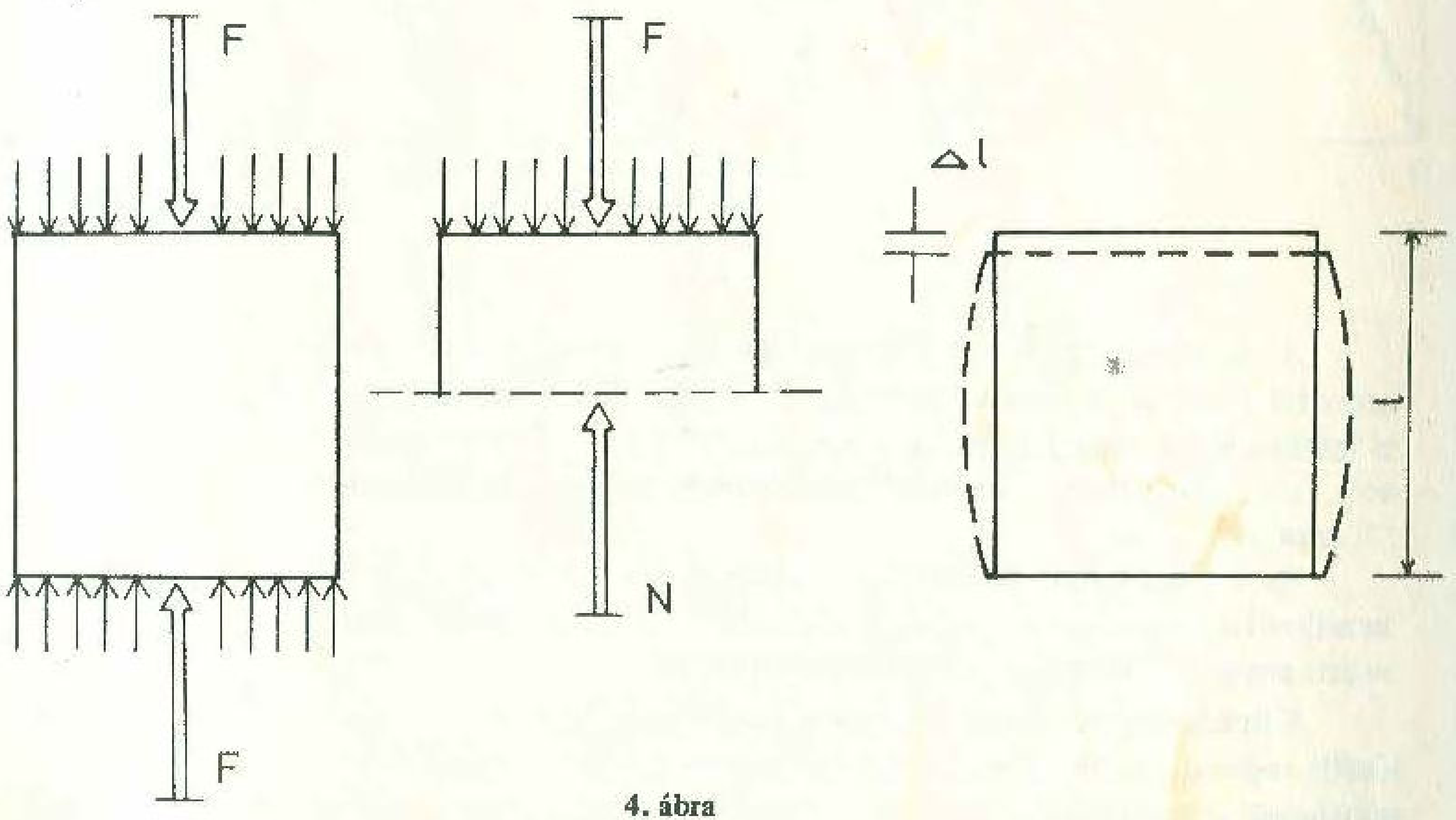
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{N}{EA}, \text{ illetve } \Delta\ell = \epsilon\ell = \frac{N \cdot \ell}{E \cdot A}.$$

A fajlagos alakváltozási (λ), illetve teljes alakváltozási munka (L):

$$\lambda = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{1}{2}\,\sigma \cdot \epsilon = \frac{1}{2}\,E\,\epsilon^2,$$

$$L = \frac{1}{2}\,N \cdot \Delta\ell = \lambda \cdot V = \frac{N^2 \cdot \ell}{2E \cdot A}.$$

Nyomott karcsú rudak esetében a kihajlási veszélyt figyelembe kell venni *(4. ábra)*.



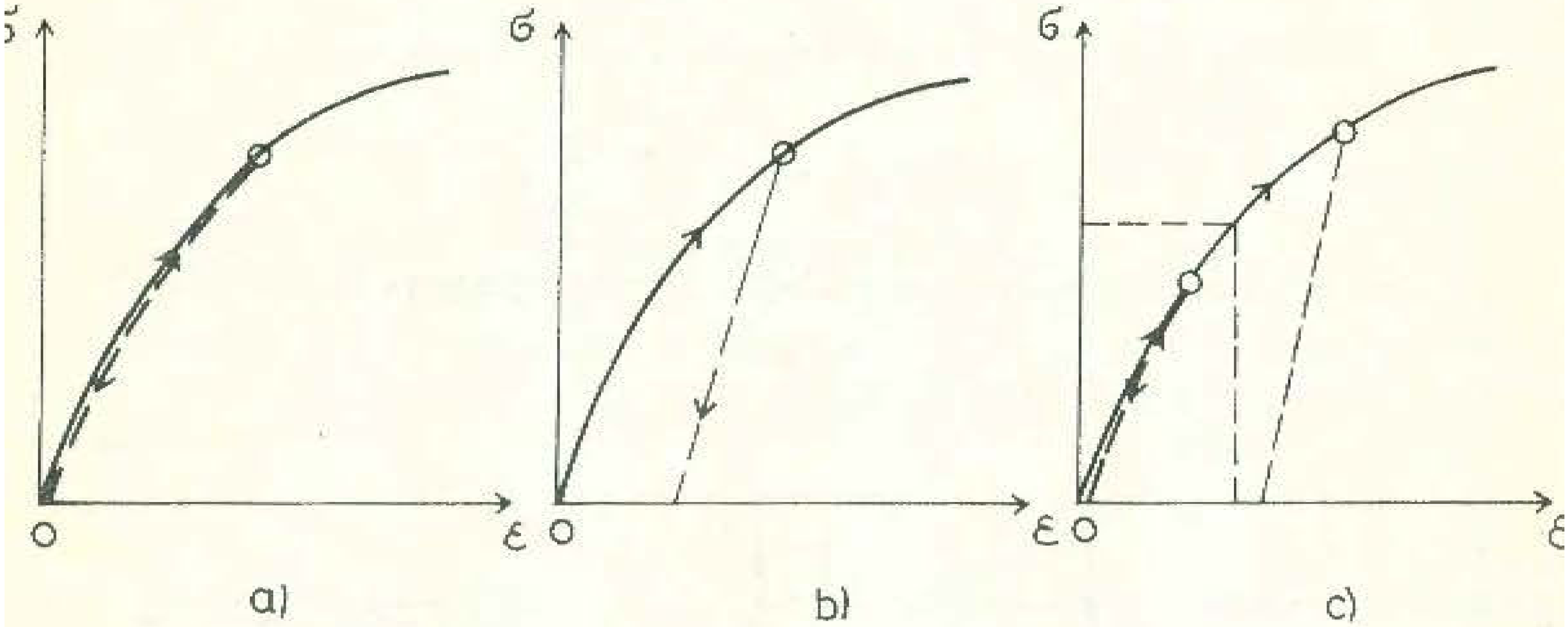
4. ábra

Az anyagjellemzők meghatározásához, a nyomószilárdság-vizsgálathoz általában zömök alakú testeket alkalmaznak a karcsúsági probléma kikerülése céljából.

Az építőanyagokat szilárdsági tulajdonságaik szerint három fő csoportba sorolhatjuk.

Az ideálisan rugalmas anyagok terhelését és tehermentesítését azonos összefüggés jellemzi, ezért a feszültségek és az alakváltozások között mindenkor kölcsönös, egyértelmű kapcsolat áll fenn. Egy teljes terhelési és tehermentesítési ciklus energiaveszteség nélkül zajlik le, tehermentesítés után nem maradnak vissza alakváltozások. A folyamat reverzibilis. A rugalmas anyagok nem alakíthatók, egy bizonyos feszültség hatására ridegen törnek *(5. ábra, a/)*.

A képlékeny anyagok terhelését és tehermentesítését különböző összefüggés jellemzi, ezért a feszültségek és alakváltozások között nem áll fenn kölcsönös egyértelmű kapcsolat. Egy teljes terhelési tehermentesítési ciklus energiaveszteséggel jár, tehermentesítés után alakváltozások maradnak vissza. A folyamat irreverzibilis. A képlékeny testek alakja törés nélkül megváltoztatható. Az e közben elnyelt – disszipált – energia hővé alakul át *(5. ábra, b/)*.



5. ábra

A rugalmas-képlékeny anyagok egy jellegzetes feszültség eléréséig rugalmasan, azon túl pedig képlékenyen viselkednek. A két állapot határát jelző feszültséget folyási feszültségnek vagy folyási hatámak (σ_f) nevezzük. A legtöbb építőanyag (folyt-acél, acél, réz, alumínium, kerámia) rugalmas-képlékeny tulajdonságokkal rendelkezik *(5. ábra, c/)*.

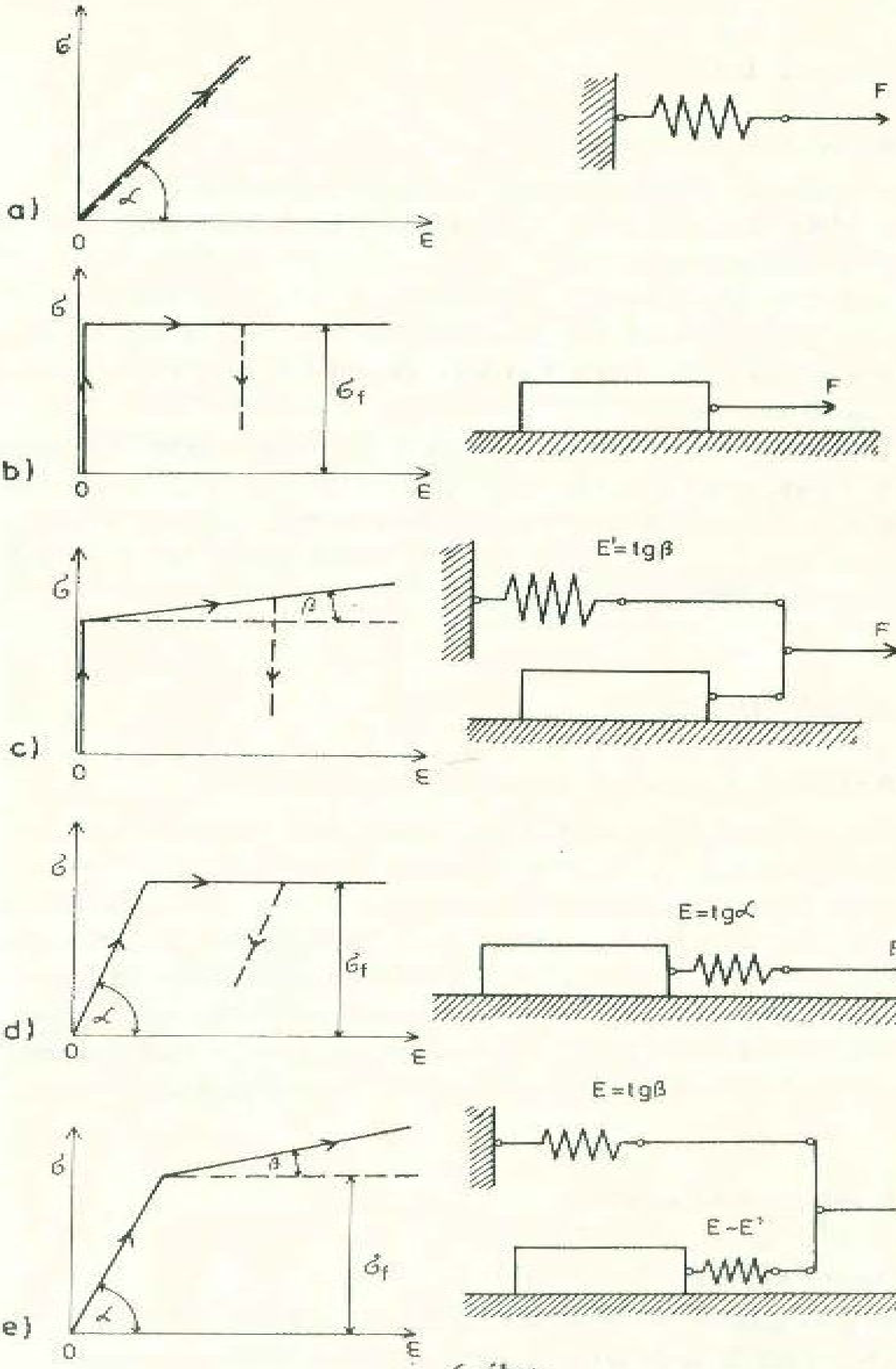
Az anyagok feszültség-nyúlás diagramjai görbe vonalak. A jó jellemezhetőség és a kezelhetőség érdekében a rugalmasságtanban és a képlékenységtanban a következő lineáris anyagmodelleket szokták használni *(6. ábra)*.

A lineárisan rugalmas, illetőleg a tökéletesen képlékeny anyag tulajdonságai egy ideális rugóval, illetve érdes lapra helyezett súlyos testtel szemléltethetők. A rugó végpontjának elmozdulása arányos az erővel. A test mindaddig mozdulatlan marad, amíg a reá működő erő egy bizonyos nagyságot el nem ér, utána viszont az erő változatlan értéke mellett tetszőleges mértékben elcsúszhat. E két elem párhuzamos és sorba kapcsolásából azután az ismertetett ideális anyagok mechanikai modelljei egyszerűen előállíthatók.

Építőanyagaink legnagyobb része a *6/d.* és a *6/e. ábrán* látható modell szerint viselkedik a terhelés hatására.

Elméleti megfontolás szerint – és ezt vizsgálati tapasztalat igazolja – egyes anyagok esetében ezek a függvények időérzékenyek.

Idézzük fel az anyagok szilárdsági jellemzőit és azok meghatározását felölelő irodalom megállapításait az idő tényezővel kapcsolatosan.



6. ábra

Az anyagok feszültség-nyúlás diagramja

a/ lineárisan rugalmas anyag; b/ merev – tökéletesen képlékeny anyag; c/ merev – lineá nyedő anyag; d/ lineárisan rugalmas – tökéletesen képlékeny anyag; e/ lineárisan rugalma san keményedő anyag

PALOTÁS L.: **Építőanyagok I.**

„13. Szilárdsági alapfogalmak.

a/ Alapfogalmak. A mechanikai vizsgálatok értékelése céljából a különböző vizsgálatokkal kapcsolatban előre kell bocsátanunk az anyagra vonatkozó néhány megállapitást.
Mindenekelőtt kijelentjük, hogy a statikus vizsgálatok értékelésekor — minthogy azokat rövid idő alatt hajtjuk végre — az idő befolyását nem vesszük figyelembe, tehát a terhelés, illetve a terhelő erő okozta feszültség sebességet elhanyagoljuk.
A statikus teher lassan növekvő, nyugvó teher. A tehernövekedés fokozatai tehát a mindenkori terhelő erők (F), illetve abból az elemi szilárdságtan módszereivel, a szóban forgó igénybevételeknek megfelelő feszültségek (σ, τ) közvetlenül, vagy közvetve rövid idő alatt (rendesen „azonnal" néhány másodpercen belül) megállapíthatók."

KALINSZKY S.: **Képlékenységtan.**

„1.1 A szerkezeti anyagok szilárdsági tulajdonságai.

A terhelés sebessége ugyancsak lényegesen befolyásolhatja az anyag szilárdsági tulajdonságait. A legtöbb anyagnál az alakváltozások és a törés körülményei másképpen alakulnak akkor, ha a teher fokozatosan, viszonylag hosszabb idő alatt éri el a legnagyobb értéket, mint olyan esetben, amikor a terhelés hirtelen, esetleg a másodperc tört része alatt zajlik le.
Például a folytacél folyási határa nagysebességű terhelés esetén a normális körülmények közötti érték kétszeresét is elérheti, ezzel egyidejűleg azonban a szakadási nyúlása lényeges mértékben csökken."

GOMBÁS P.: **Fizika mérnökök számára.**

„12. §. A rugalmasságtan elemei.

Szilárd test alakváltozására jellemző, hogy a testet felépítő egymással érintkező részecskék alakváltozás után is érintkezésben maradnak egymással. Ilyen alakváltozás esetén a testet alkotó részecskék egymáshoz képest kissé eltolódnak. A részecskék elmozdulása kényszermozgás: Minden részecske elmozdítja a szomszédos részecskéket. Ezt a kényszert is kényszererőkkel, az ún. rugalmas erőkkel helyettesítjük.

Természetükről a tapasztalat nyújt felvilágosítást . . . A szilárd testek alakváltozása többféle lehet. Ezeket erők hozzák létre. Ha az erőhatás megszüntével a test visszanyeri eredeti alakját, rugalmas alakváltozásról beszélünk. Ellenkező esetben az anyag maradandó alakváltozást szenved. Az előbbi esettel állunk szemben mindig, ha az alakváltozás a test méreteihez képest kicsi. Azonos alakú anyagoknál kísérletileg meghatározhatjuk azt a felső határt, melyen túl az alakváltozás már maradandó. Kísérletünk eredménye az lesz, hogy ez a határ, az ún. rugalmassági határ a test anyagi minőségétől függ, tehát különböző anyagokra különböző. Ha az alakváltozást ezen túl növeljük, elérhetünk egy olyan határt, melynél a test részecskéi már elszakadnak egymástól. Különböző anyagoknál ez a határ is más és más. Azt mondjuk: A testek szilárdsága különböző".

E témakörben meghatározó szerepet betöltő irodalmunk érintőlegesen említi, hogy az anyagok szilárdsági jellemzőinek meghatározásánál szerepe lehet az időnek. Ezt a szerepet azonban elhanyagolandónak, vagy másodlagos hatásúnak ítéli meg. Meghatározónak tartja az erő és a felület viszonyát.

Elméleti megfontolásaink és vizsgálati tapasztalatunk egyrészt arra mutat, hogy az anyagok nyomószilárdságának meghatározása során egyre kevésbé lehet csak a $\sigma = \frac{F}{A}$ összefüggésből kiindulni.

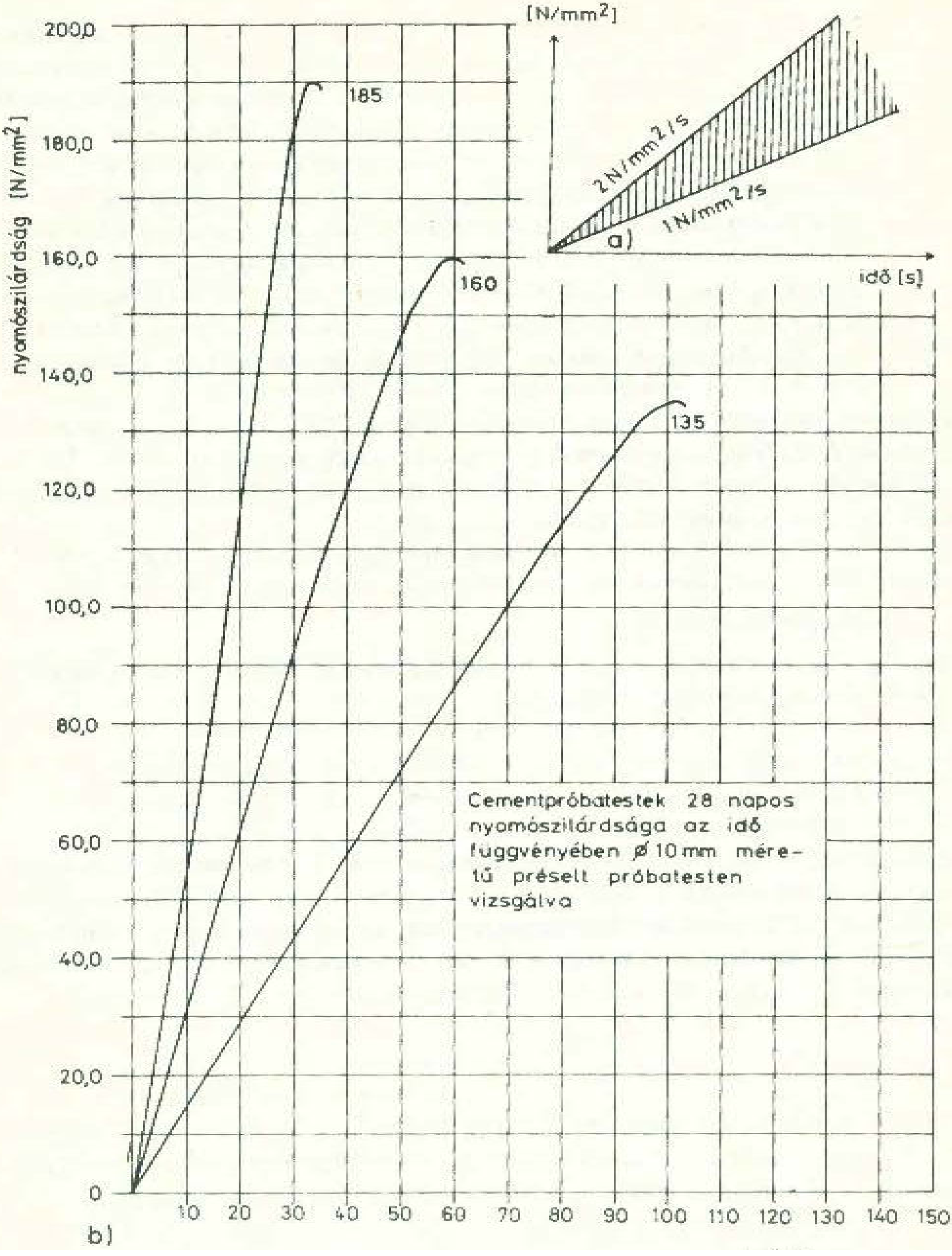
Ha figyelembe vesszük a vizsgálat során lejátszódó folyamat összes fizikai tényezőit, akkor az alábbi képletet írhatjuk fel:

$$\sigma = \frac{\int_{to}^{t} F \, dt}{A}.$$

Vagyis a számlálóban nem elegendő csupán az erőt (F) feltüntetni, hanem az erő – erőváltozás – időszerinti integrálját, melyet a fizika „impulzus"-nak nevez. Az anyagok szilárdsági tulajdonságainak meghatározása során tehát akkor tekinthetjük az anyagra jellemző feszültséget helyesnek, ha feszültséget előidéző erőt azonos impulzussal állítottunk elő, vagyis

$$\int_{to}^{t} F \, dt = \text{konstans}.$$

Ez a feltétel azonban önmagában nem elegendő, hiszen különböző erő-idő függvényekhez eltérő F_{max} értékek tartoznak. Ennek az összefüggésnek ismeretében határozták meg néhány szerkezeti anyagra az erő-időfüggvény határokat, betonra pl. a *7. ábra* szerintit.


[N/mm²]
2 N/mm²/s
1 N/mm²/s
a)
idő [s]
nyomószilárdság [N/mm²]
200,0
180,0
160,0
140,0
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0
185
160
135
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150
Cementpróbatestek 28 napos nyomószilárdsága az idő függvényében ø 10 mm méretű préselt próbatesten vizsgálva
b)

Ezen időhatárok között tényleges erő-idő függvényhez tartozó F_{max}-ból származó feszültség adja a beton nyomószilárdságát. Tudjuk azonban, hogy beton esetében sem lineáris e függvény, és a megadott határok is elég széles mezőt jelentenek. A *7/b. ábra* az azonos minőségű betonpróbatesteken végzett különböző sebességű nyomószilárdság-vizsgálatok erő-idő függvényét mutatja, automatikus szabályozású INSTRON 1196 típusú berendezésen. Az így meghatározott szilárdság értéke tehát sok bizonytalanságot tartalmaz. Számtalan más anyagfajtánál (pl. acél, fémek, műanyagok) azonban még e közelítő módszert illetve előírást sem lehet alkalmazni, mert az anyagok terhelés során olyan eltérő tulajdonságú szakaszokon mennek keresztül, hogy a függvények szabályok közé szorítására nincs lehetőség.

Ahhoz, hogy az anyagok nyomószilárdságának megállapításához azonos feltételeket tudjunk biztosítani, ki kell elégíteni azt a feltételt: **„hogy az erők ugyanazon időintervallumra eső munkája azonos legyen"**.

Az elemi munka kifejezésének átalakításával:

$$\bar{F}\, d\bar{s} = m\, \frac{d\bar{v}}{dt} \cdot ds = d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = dT.$$

Az elemi munkaképletben szereplő $T = \frac{mv^2}{2}$ mennyiséget kinetikai mozgási energiának nevezzük.

$$T = \frac{dT}{dt} = U = \bar{F} \cdot \bar{v}.$$

E kifejezés t, t_o időintervallumra vonatkozó integrálja, azaz az erők ugyanazon időintervallumra eső munkája:

$$\int_{(t)} \bar{F}\, d\bar{s} = \int_{(t)} dT \qquad \Delta T = T - T_o = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_o^2}{2} = W.$$

Tehát a P_o- P út mentén végzett munka egyenlő $\frac{1}{2} mv^2$ megváltozásával, vagyis $1/2\ mv^2$-nek P és P_o pontokban vett értékei különbségével.

Azonos feszültség eléréséhez tehát azonos munkát kell végeznünk megadott időintervallumon belül, vagyis az időegységre eső munka azonos. És itt elérkeztünk a teljesítmény fogalmához:

$$U = \frac{dW}{dt} \text{ a munka idő szerinti}$$

differenciálhányadosa. Átalakítva:

Ezek után meghatározhatjuk általánosan is a szilárd anyagok nyomószilárdságának fogalmát:

Az anyagban levő feszültségi állapot értéke függ a feszültségi állapot eléréséhez szükséges fajlagos teljesítmény értékétől, ezért két feszültségi állapot akkor – és csak akkor – tekinthető egyenértékűnek, ha a feszültségi állapot eléréséhez tartozó teljes fajlagos – térfogatra vonatkoztatott – teljesítmény azonos.

Az egyenestengelyű állandó keresztmetszetű próbatest egyszerű igénybevételére felírva:

$$\sigma = \frac{W}{V} = \frac{J/s}{V} = \frac{J}{s \cdot V},$$

dimenzió:

$$\sigma = \frac{N \cdot mm}{s \cdot mm^3} = \boxed{\frac{N}{s \cdot mm^2}}.$$

Az egyes anyagok szilárdságának vizsgálatánál tehát a próbatest méretét és az erőemelkedés sebességét oly módon kell megválasztani, hogy az a fenti képlet szerint azonos értéket adjon. Ha ezt sikerül biztosítani, abban az esetben „azonosan előállított" feszültségi állapot hat az anyagra, tehát az egyes anyagfajták nyomószilárdsági értékei egymáshoz hasonlíthatók. A tönkretevő erő felületegységre számított értékei – a teljesítményazonosítás alapján – egy mérési rendszerbe kerültek, így a $\sigma = \frac{F}{A}$ összefüggés mindig azonos értéket mutat.

A mechanika jelenleg a statikus szilárdság fogalmát, illetve annak vizsgálatát így fogalmazza:

„– statikus vizsgálatok, melyeknél a terhelés fokozatosan növekvő módon, és nem lökésszerűen, rövid idő alatt ér el egy meghatározott értéket . . . ennek megfelelően ismerünk statikus szilárdságot".

E helyett az alábbi megfogalmazást tartjuk helyesnek:

– statikus vizsgálatok, melyeknél a terhelés folyamatosan növekvő módon éri el a tönkretételi értéket, úgy, hogy a teljes fajlagos teljesítmény értéke mindig azonos legyen. (Gyakorlati határok között.)

Ez a statikus vizsgálat, felfogásunk szerint egy olyan anyagjellemzőt határoz meg, mely a dinamikus és a tartós terhelés között helyezkedik el. Hogy a statikus igénybevétel pontos helyét meg lehessen határozni, szükséges a vizsgálati teljesítményazonosítás.

3. AZ ANYAGOK NYOMÓSZILÁRDSÁG-VIZSGÁLATÁNAK GEOMETRIAI FELTÉTELEI

3.1 Próbatest geometria

A feszültség és a szilárdság fogalmát, melyet a rugalmasságtani, illetve szilárdságtani meghatározásainknál alapul veszünk, tulajdonképpen egy átlagos feszültség, amelyet véges nagyságú próbatestek, véges felületek alapján határozunk meg. Ezt a fogalmat – mivel a technikai gyakorlat használja – technikai feszültségnek, illetve technikai szilárdságnak nevezzük.

Az anyagok nyomószilárdságát véges nagyságú próbatestek – egyenes tengelyű rudak – egyszerű igénybevételével határozzuk meg. Normál igénybevételről – esetünkben tiszta nyomásról – van szó, ha az egyenes tengelyű (ℓ) hosszúságú, állandó (A) keresztmetszetű, prizmatikus vagy hengeres rúd végkeresztmetszetein egyenletesen megoszló, a tengellyel párhuzamos – illetve a keresztmetszetre merőleges – külső erők hatnak. Ezeknek az erőknek az eredője a rúdtengelybe eső F erő.

Az elméleti megállapítással összhangban a vizsgálati gyakorlat is alapvetően két geometriai formát alkalmaz:

Figyelemmel a nyomott rudak esetében fellépő kihajlási veszélyre a négyzetes hasáb oldalainak aránya, valamint a hengerátmérő és az alkotó arányában az 1 : 3 értéket nem haladják meg.

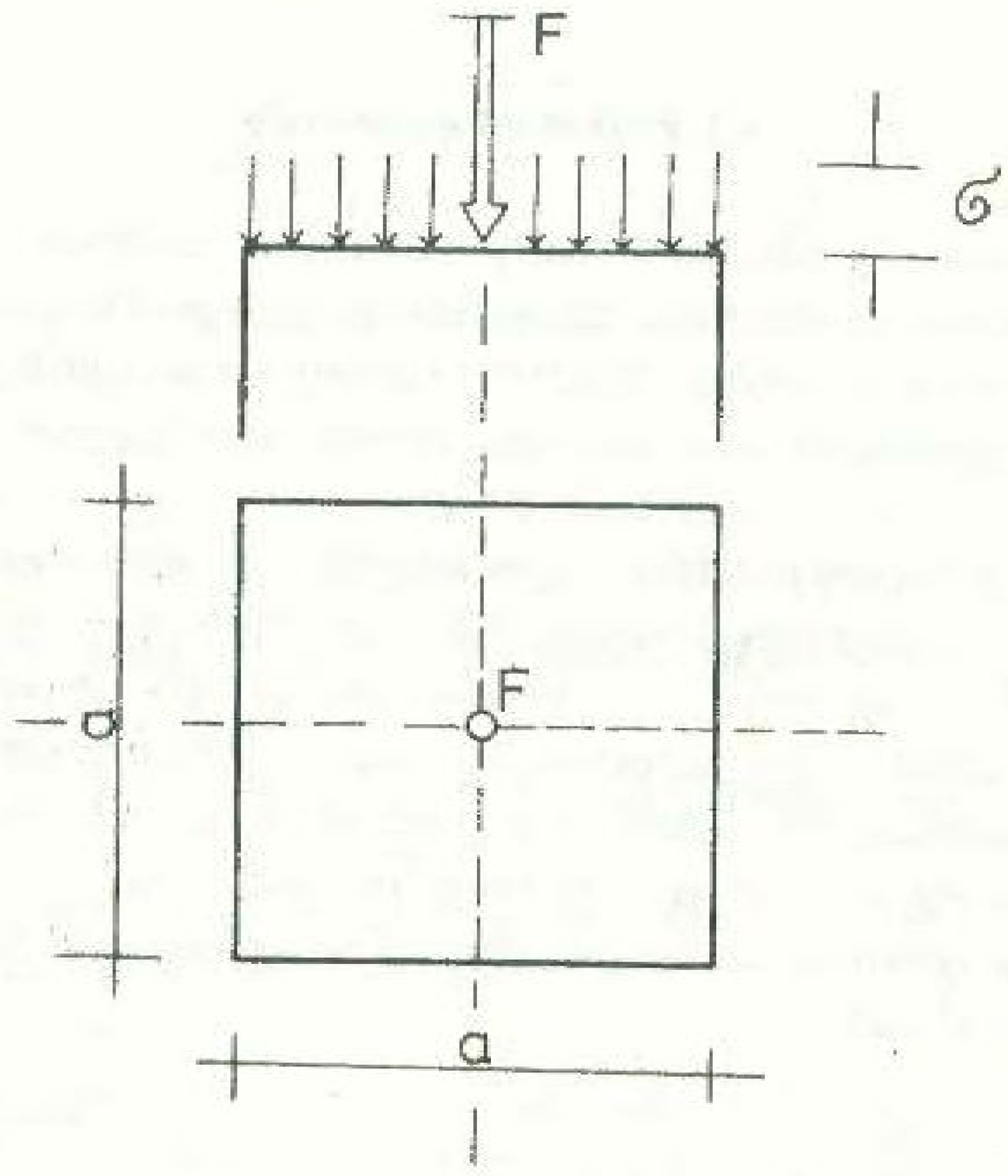
Vizsgáljuk meg, hogy az alapvetően kétféle geometriai forma – mérettől függetlenül – mennyiben alkalmas az elméletileg megkívánt állapot elérésére.

A nyomószilárdság-vizsgálat egyik alapfeltétele tehát, hogy a próbatestre egyenletesen megoszló, tengellyel párhuzamos külső erők hatnak, melyek eredője egybeesik a rúdtengellyel.

Ezt az elméleti kívánalmat a vizsgálati gyakorlatban csak megközelíteni lehet, teljes biztonsággal előállítani nem. Elméleti pontossággal nem lehet centrikus egy anyagvizsgáló gép, a vizsgálandó próbatest — a legnagyobb gondossággal készítve — sem lehet elméleti pontosságú méretben és elméletileg is homogén eloszlású anyagból (anyagi excentricitás).

Ezen okokból adódóan minden vizsgálat során létrejön egy bizonyos mértékű excentricitás, melyeknek mértékét és jellegét kívánjuk boncolgatni abból a célból, hogy a vizsgálati gyakorlatban minél szűkebb határok közé tudjuk szorítani ezek káros hatását.

Vizsgáljuk meg a négyzet keresztmetszetű próbatest külső erőkkel való terhelésének eseteit *(8. ábra)*.

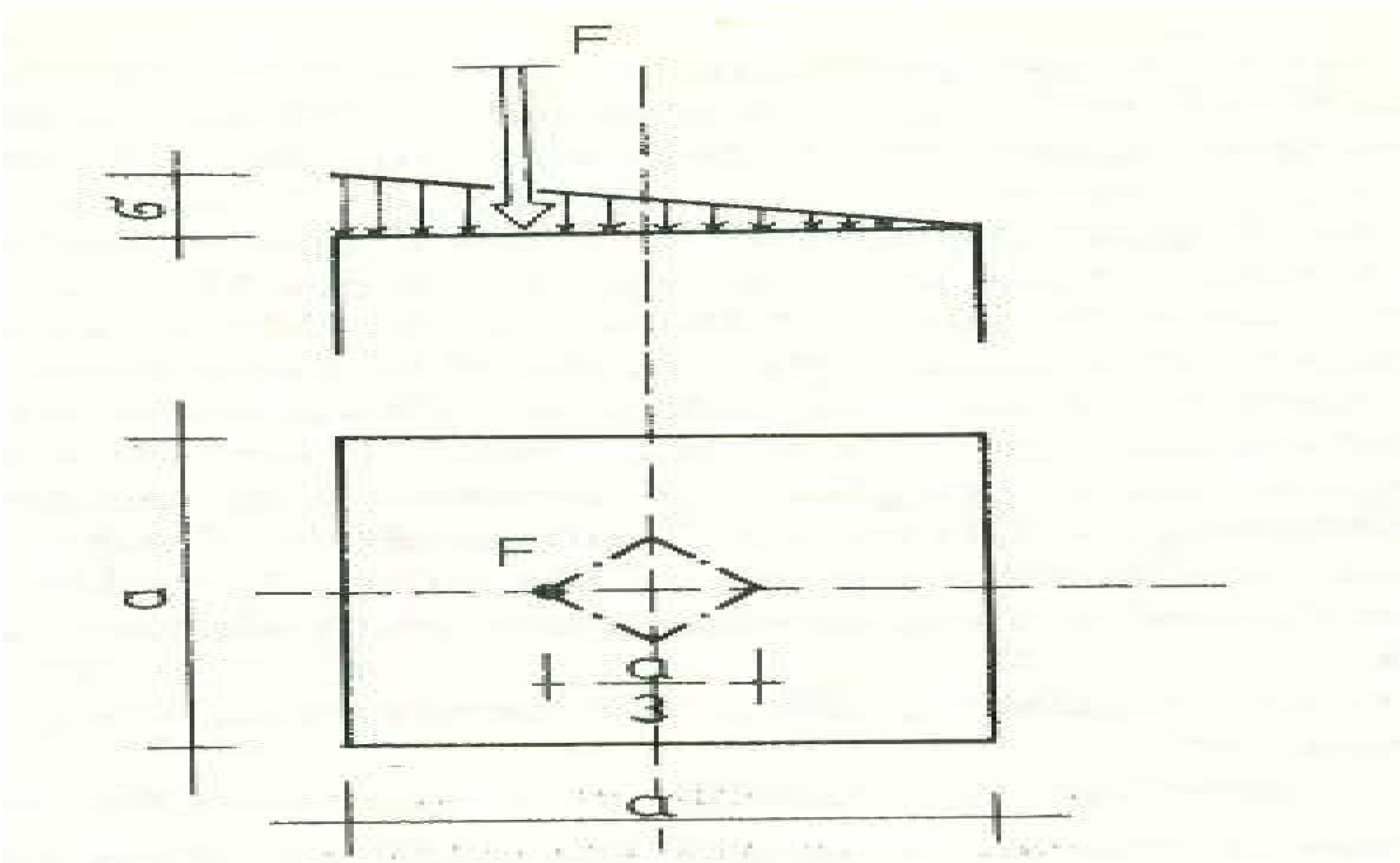


8. ábra

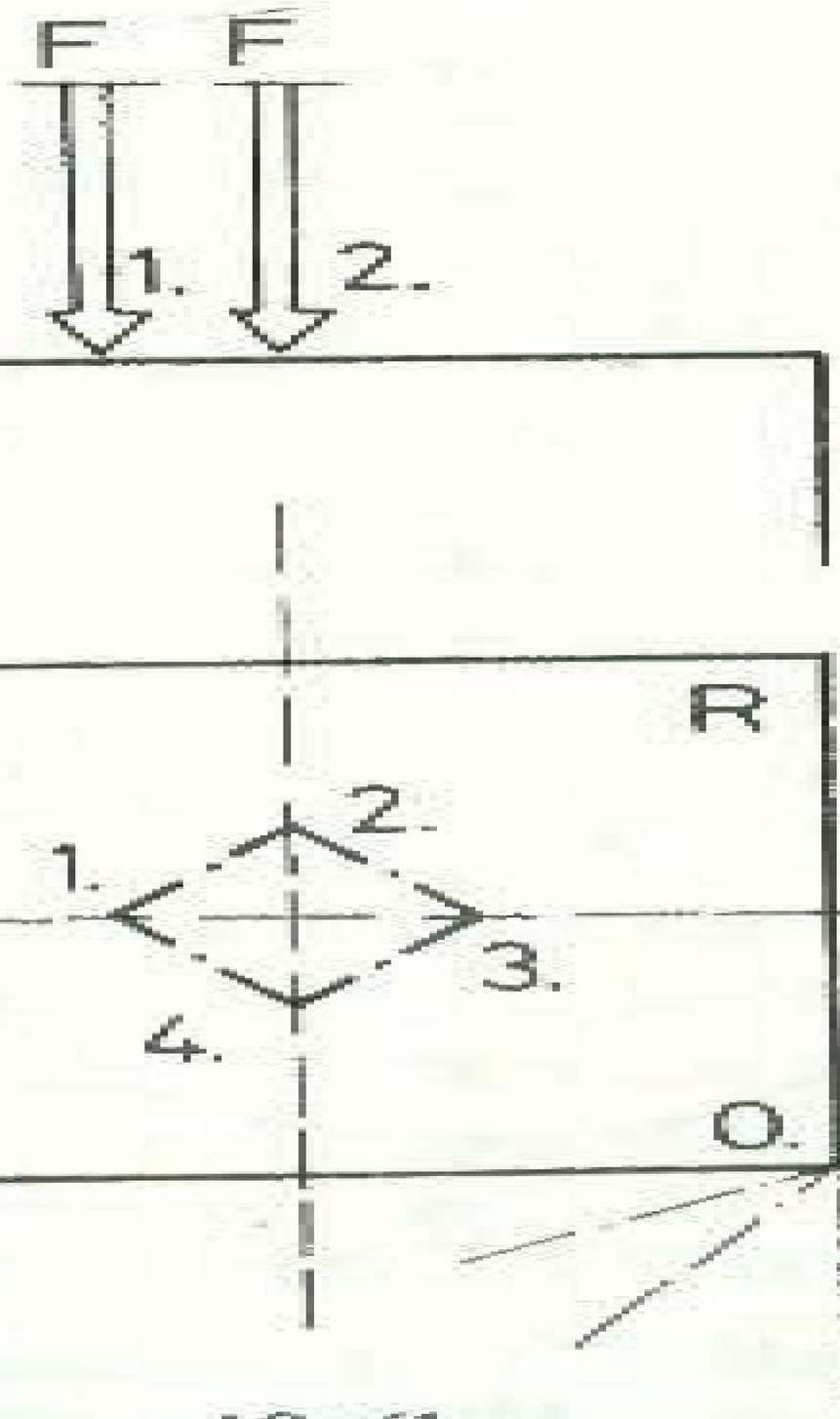
Az eredő erő centrikusan helyezkedik el a próbatest keresztmetszetén, a mért szilárdsági érték azonos az elméletileg megkívánt értékkel, tehát a $\sigma = \frac{F}{A}$ kifejezés helyénvaló.

Ha az eredő erő a keresztmetszet magidomának határán helyezkedik el, akkor a $\sigma = \frac{F}{A}$ összefüggés a megkívánt tényleges értéknek $\frac{1}{2}$ részét adja *(9. ábra)*.

Ha az F erőt a magidom 1. és 2. jelű pontja közötti egyenes szakaszon végigvezetjük, akkor a feszültségi semleges tengely a 0. jelű ponton keresztül 90°-os szögforgást végez *(10. ábra)*.



9. ábra



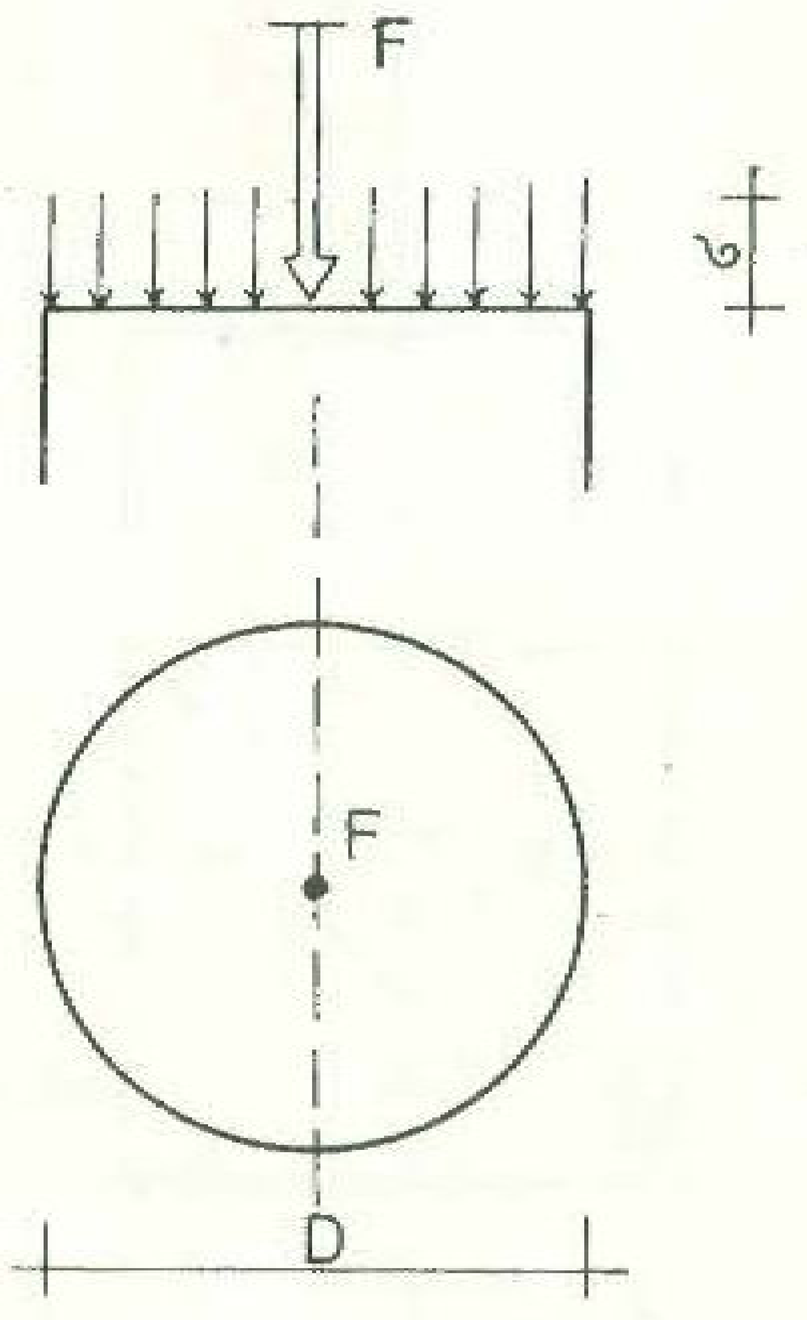
10. ábra

Ha az F jelű erő az 1. jelű pontban van, akkor a feszültségi semleges tengely a négyzet keresztmetszet $\overline{OR}$ jelű oldalával esik egybe, ha az F jelű erő 2. jelű pontban van a feszültségi semleges tengely a négyzet keresztmetszet $\overline{KO}$ jelű oldalával esik egybe.

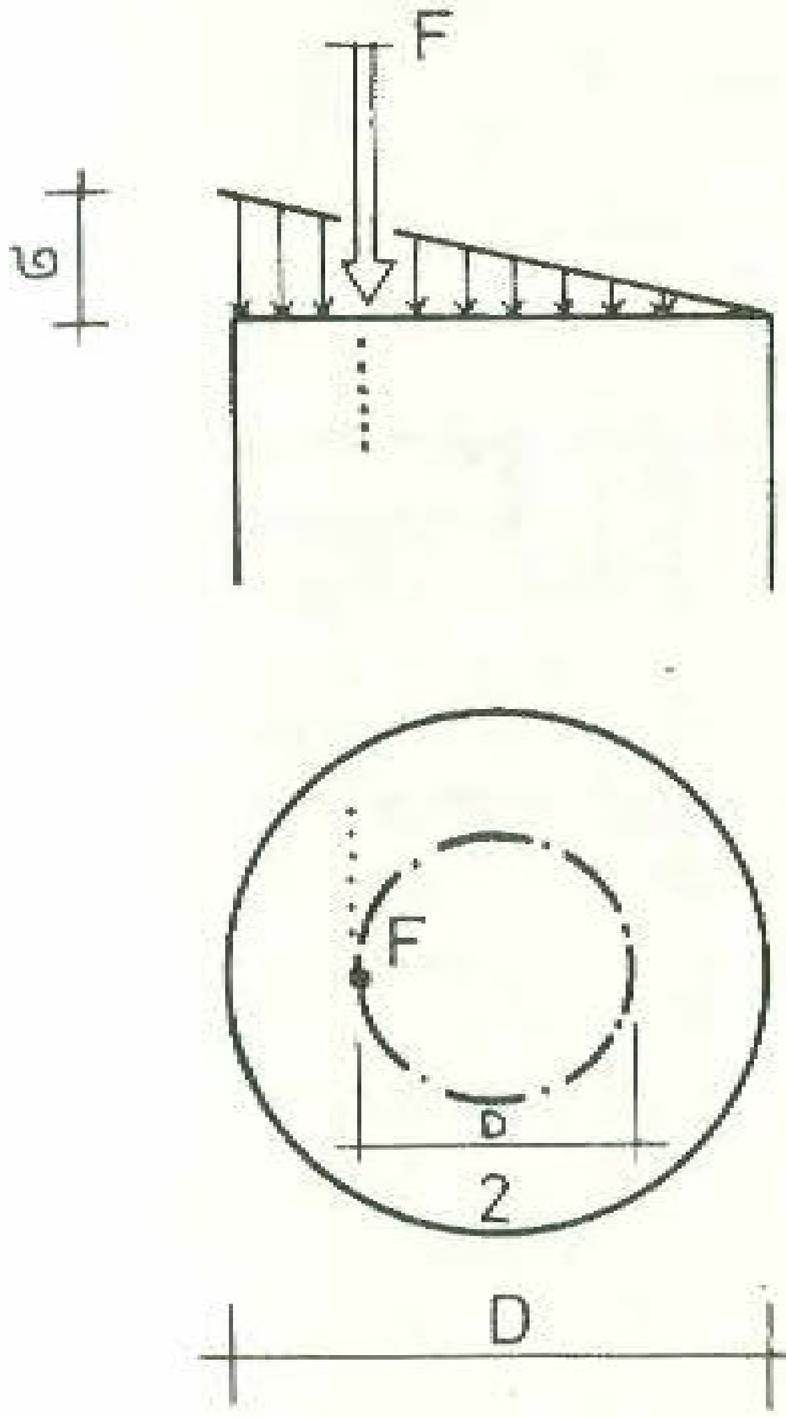
Megállapíthatjuk, hogyha a magidom határán körbe vezetjük az F erőt, közben a feszültségi semleges tengely csupán a magidomhatár négy (1. 2. 3. 4. jelű) pontján levő erő esetében egyezik a keresztmetszet oldaléleivel, a többi esetben a feszültségi semleges tengely a keresztmetszet sarkain helyezkedik el különböző szögelhajlással. Tehát a feszültségi semleges tengely döntő mértékben a sarkokban helyezkedik el és csak a négy ponthoz tartozó esetben egyezik az oldalélekkel. Ha tehát az excentricitást előidéző technikai körülmények – vizsgáló gépexcentrikusság, próbatest geometriai vagy homogenitási egyenlőtlenség – folytán az F erő az elméleti középvonaltól kényszerül eltérni – a geometriai feltételekből adódó, előbbi leírással érzékeltetett – „szögletesen vonzó" hatásnak van kitéve, mely a sarkos próbatestek sarkain egyébként is meglevő problémákat fokozza.

Vessük ugyanilyen vizsgálatnak alá a kör keresztmetszetű próbatest külső erővel való terhelésének esetét.

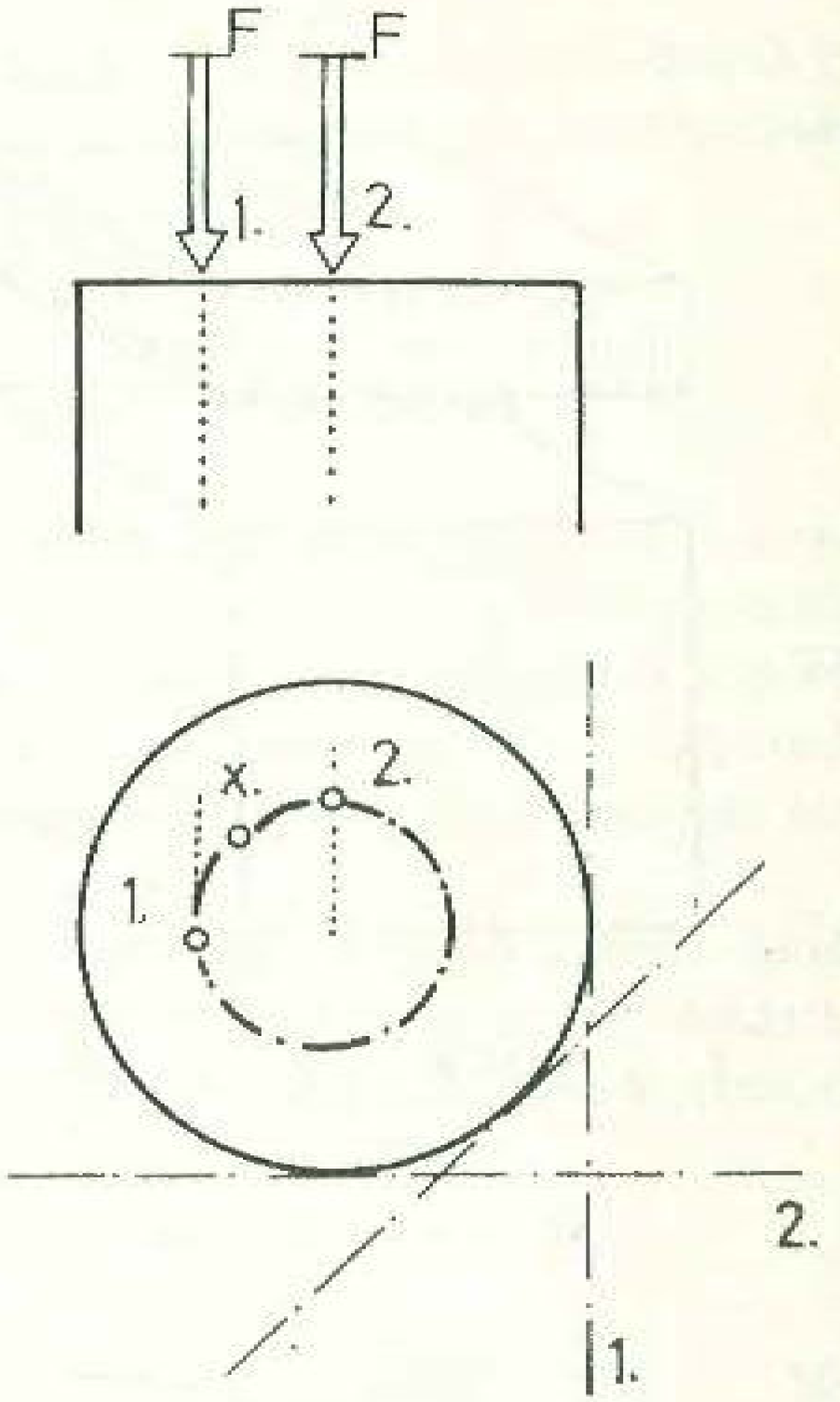
Az eredő erő centrikusan helyezkedik el a próbatest keresztmetszetén, a mért szilárdsági érték azonos az elméletileg megkívánt értékkel, tehát a $\sigma = \frac{F}{A}$ kifejezés helyénvaló *(11. ábra)*.



11. ábra



12. ábra



13. ábra

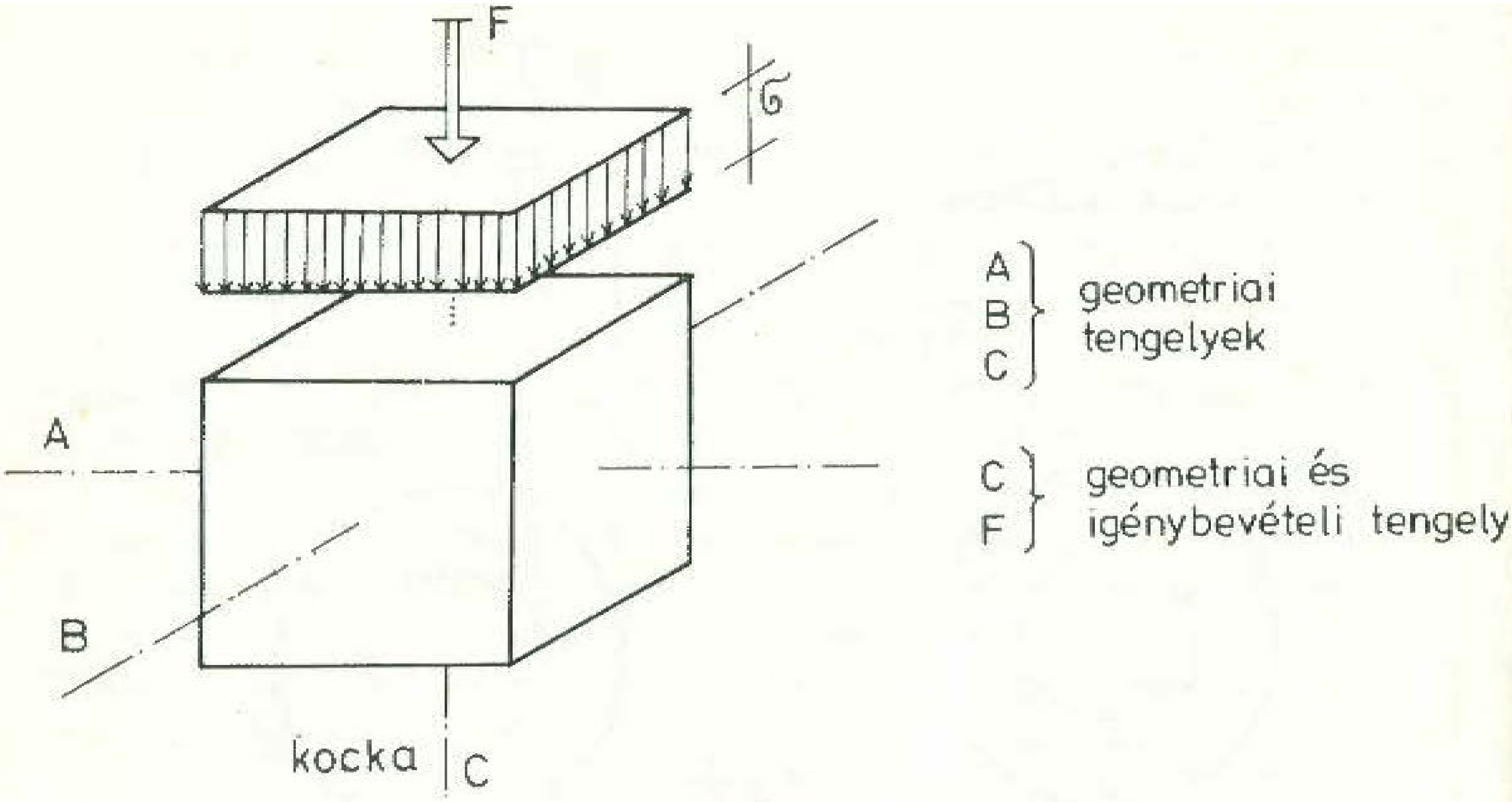
Ha az eredő erő a keresztmetszet magidomának határán helyezkedik el, akkor a $\sigma = \frac{F}{A}$ összefüggés a megkívánt tényleges értéknek $\frac{1}{2}$ részét adja *(12. ábra)*.

Ha a magidom 1. és 2. jelű pontja közötti szakaszon végigvezetjük az F erőt, a feszültségi semleges tengely a 0. ponttól a K. pontig halad a keresztmetszet határvonalát jelentő kör érintőjeként *(13. ábra)*.

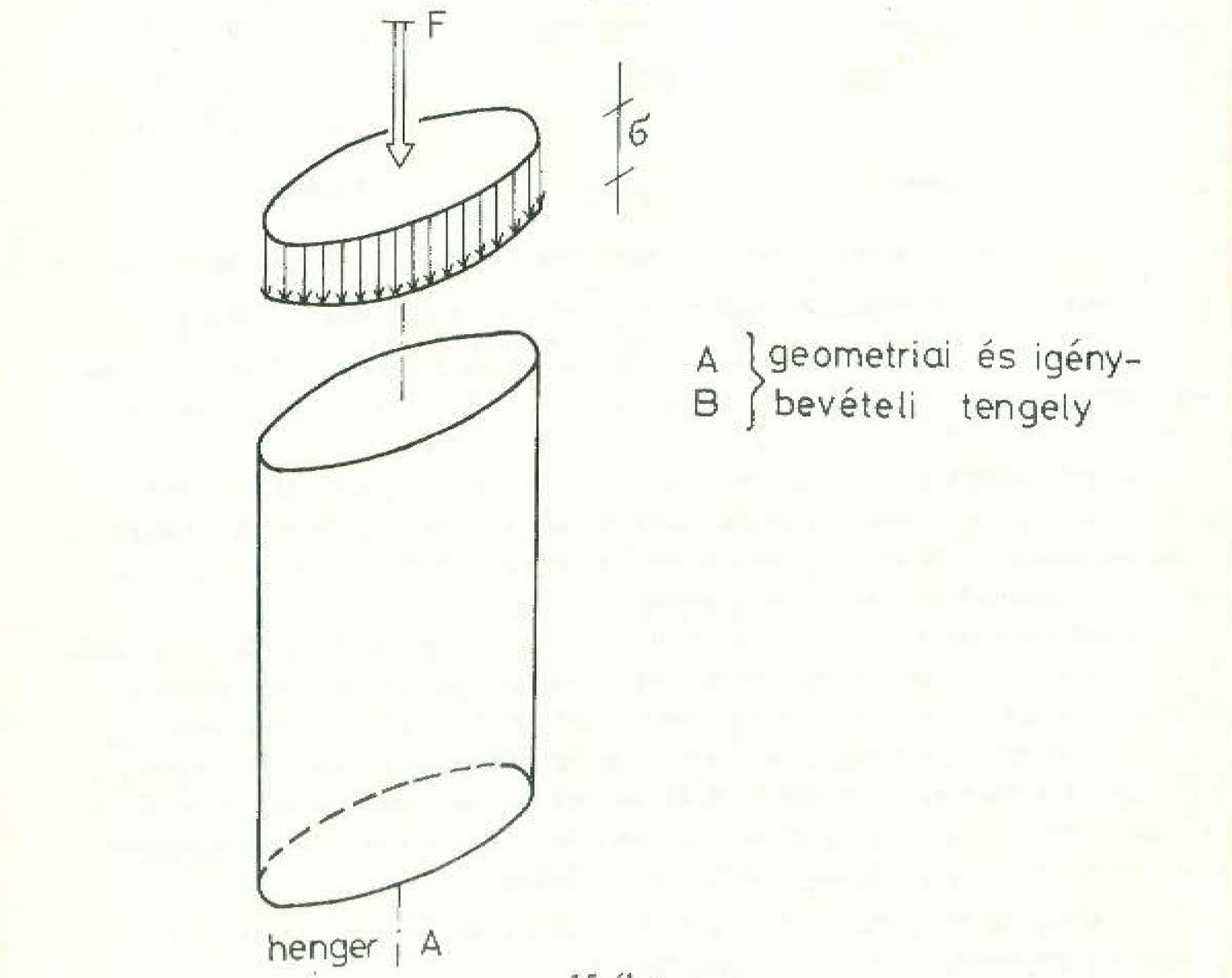
Megállapíthatjuk, hogyha a magidom határán körbe vezetjük az F erőt, közben a feszültségi semleges tengely a keresztmetszet határát érintő egyenesként fut körbe. A magidom határán tetszőleges ponton elhelyezkedő erő és a feszültségi semleges tengely viszonya a keresztmetszethez mindig azonos.

Körkeresztmetszetű hengerpróbatest esetén az excentricitást előidéző technikai körülmények – vizsgáló gépexcentrikusság, próbatest geometriai, vagy homogenitási egyenlőtlenség folytán – az F erő az elméleti középvonaltól kényszerül eltémi a geometriai feltételekből adódóan az előbbi leírással érzékeltettek szerint bármelyik irányú eltérés azonos poziciót jelent. A körkeresztmetszet esetén tehát „geometriából származó vonzás" nincs. Ez a körülmény jelentős érvnek számít a körhengeres próbatest formák javára, a kocka vagy prizmatikus rudakkal szemben *(14. ábra)*.

A körhengeres próbatestek alkalmazása mellett szól az a logikai érv is, hogy egytengelyű igénybevétel egytengelyű geometriát kíván *(15. ábra)*.



14. ábra



15. ábra

Ezen meggondolások előrevetítése után foglalkozunk a vizsgálati próbatest és a vizsgáló eszköz viszonyát alapvetően meghatározó próbatestméret, az érintkezősíkok – nyomólapok – és a gömbcsukló problémájával.

3.2 A próbatest elhelyezkedésének geometriai feltétele

A vizsgálat tárgyául szolgáló anyagnak a betont választottuk igen kis – 1 és 3 mm-es maximális – adalékanyag szemnagysággal azért, hogy a próbatest méretváltoztatásának lehetőségét jelentősen növelhessük. Mindenképpen ügyeltünk arra, hogy a legkisebb próbatestméret esetén is a szemcsés anyagokra vonatkozó mérettörvény – gyakorlatban ismert – határait betartsuk, és a készített vizsgálati testeket kvázi homogén anyagoknak tekinthessük.

Az előírás – mely GEHLER javaslata alapján készült – a beton nyomószilárdsága esetén alapértéknek a 20 cm^3 méretű kocka próbatesten mért értéket tekinti, és szorzószámokat ad meg az 5, 7, 10, 15, 25 és 30 cm élhosszúságú próbatesten mért eredmények átszámításához.

Ezen átszámítási értékek beton esetében az MSZ szerint az alábbiak:

A kocka élhosszúsága (cm)	5	7	10	15	20	25	30
a	0,72	0,80	0,87	0,95	1,00	1,05	1,10

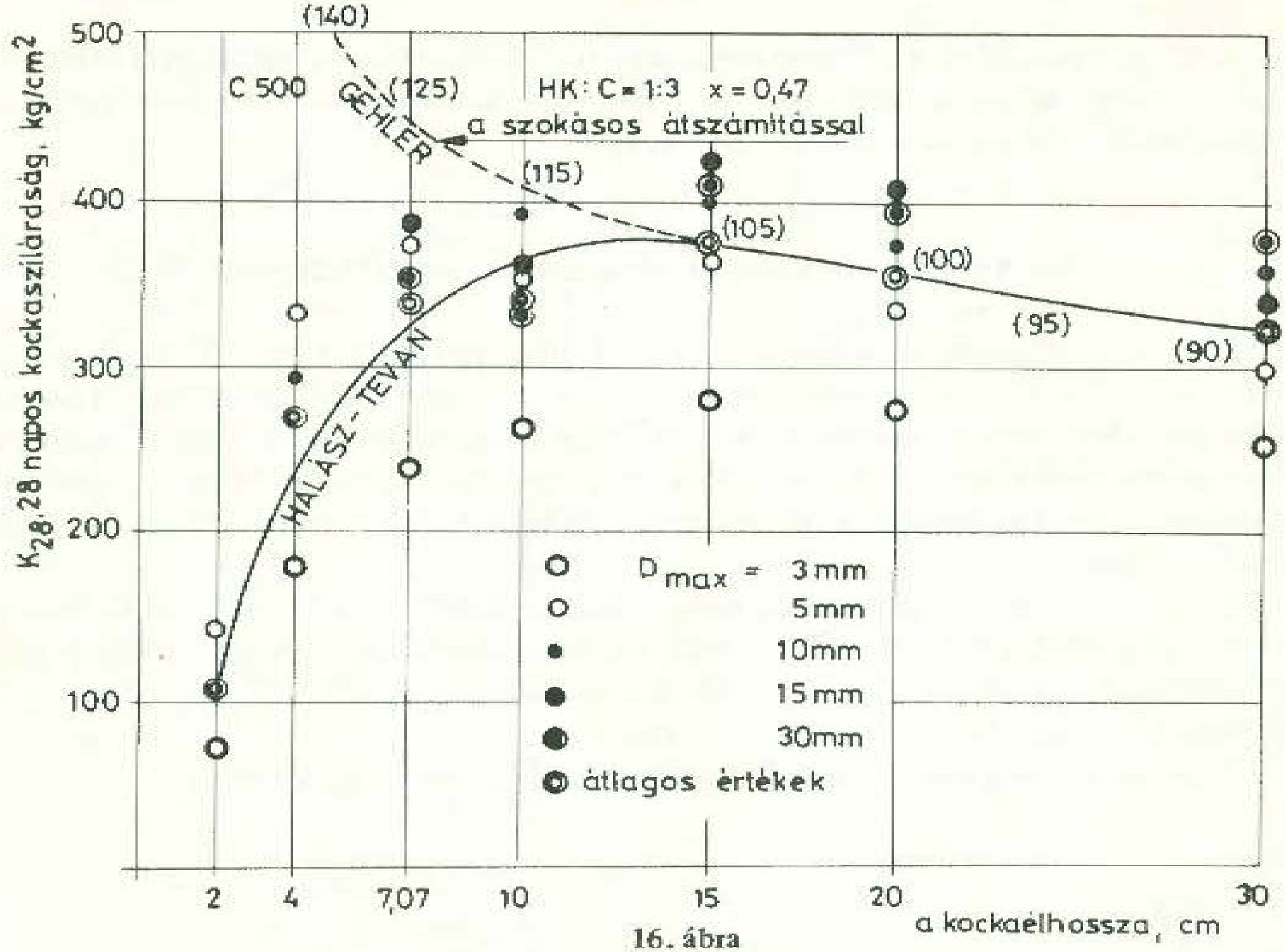
A sokéves vizsgálati tapasztalat nemcsak, hogy nem erősítette meg ezeket az értékeket, hanem az esetek többségében ellentétes eredményeket adott.

A beton nyomószilárdságának és a próbatest élhosszúságának összefüggésére HALÁSZ-TEVAN kutatók végeztek kísérleteket.

Az eredményekből az olvasható ki, hogy a legnagyobb nyomószilárdságot adó élhosszúságnál kisebb, illetve nagyobb élhosszúságú kockák egyaránt csökkenő szilárdságot adnak. Ezen kísérleti eredmények az MSZ előírásban foglaltakkal ellentétesek, de L' Hermite kísérleti eredményeivel összhangban vannak.

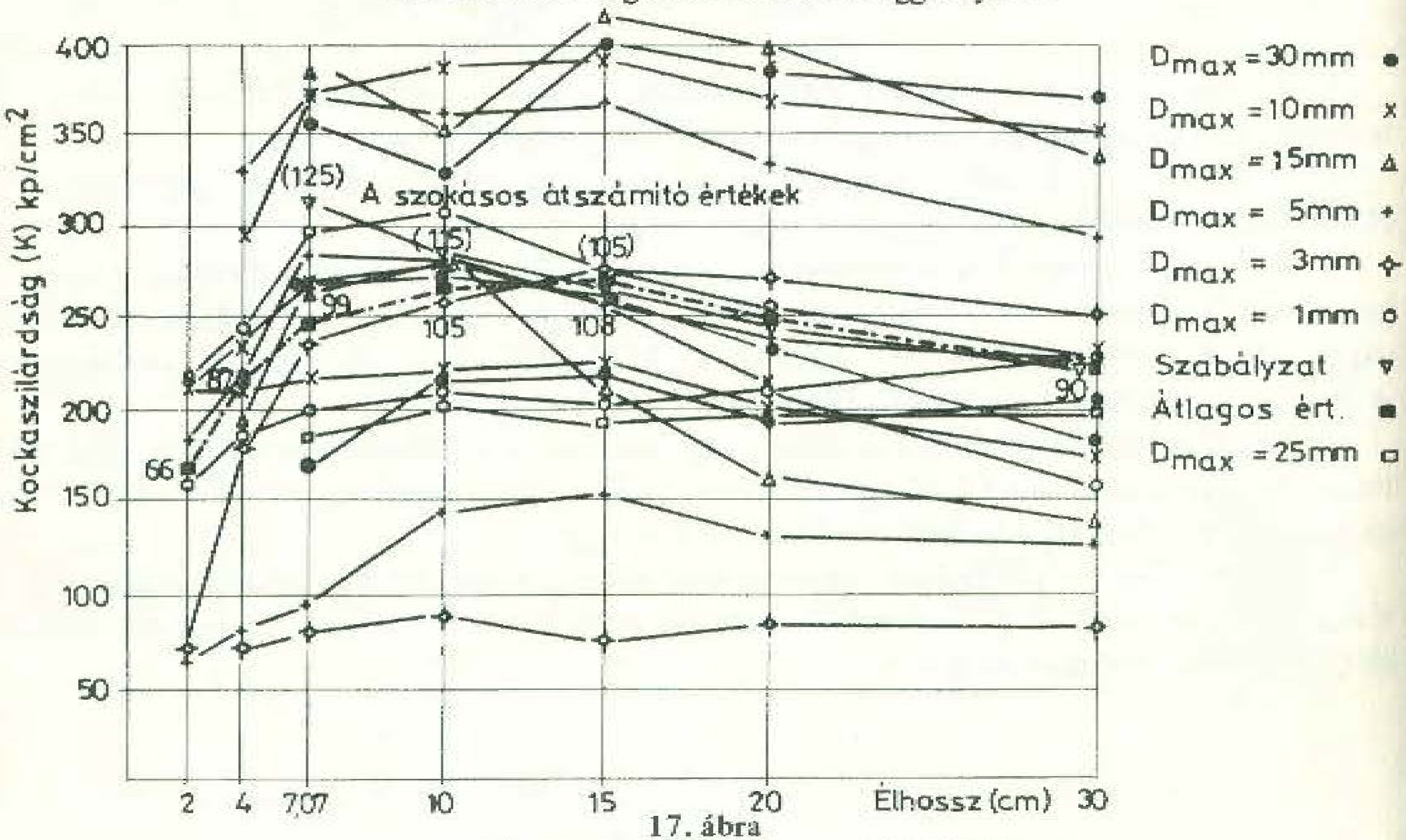
Az élhosszúság és a nyomószilárdsági eredmények eltérő tendenciáit mutatják be a *16. ábrán*, mely a PALOTÁS: Építőanyag II. c. könyvéből való, valamint a *17. ábra*, melyen L' Hermite kísérleti eredményei láthatók.

A *16. ábrán* is jól látható teljesen ellentétes tendenciák tisztázatlansága miatt a vizsgálati gyakorlatban is nagyfokú bizonytalanság uralkodik és számtalan egymásnak ellentmondó eredmény születik.



16. ábra

A kockaszilárdság a kockaélhossz függvényében



17. ábra

A kockaszilárdság és a kockaélhossz (L' HERMITE)

Sajnos a problémakörrel foglalkozó korábbi kutatások részleteit (mint pl. anyagvizsgáló géptípus, törőpofák, kiképzése, nyomólapok stb.) nem ismerjük, így sok utólagos elemzéstől el kellett tekintenünk, és csupán a közölt eredmények elemzésére támaszkodhattunk a kísérleti tervünk összeállításánál.

A nyomószilárdság-vizsgálat folyamatának felülvizsgálata során az alábbi két olyan körülményre összpontosítottuk a figyelmünket, amelyeket az eddig e tárgyban végzett kutatások nem tekintettek meghatározó jelentőségűnek:

a) a próbatest és a gömbcsukló méretviszonyai,

b) az erőnövekedés sebességének megválasztása.

Kutatásunkban a kocka- és henger próbatestek élhosszúságának illetve átmérőjének és a nyomószilárdság-vizsgálathoz alkalmazott gömbcsukló méreteinek összefüggését tettük vizsgálat tárgyává.

a) A gömbcsukló feladata a nyomószilárdság-vizsgálat során

A nyomószilárdság vizsgálatra készített (vagy kivágott) próbatest a legnagyobb gondosság mellett sem felel meg pontosan annak a geometriai formának, amelyet előre meghatároztunk.

A nyomófelületek nem teljesen síkok, a két nyomófelület nem teljesen párhuzamos. Ezen kívül a próbatestnek a nyomólapra való elhelyezése is rejt magában hibalehetőséget.

A próbatestek itt felsorolt hibáit nevezhetjük „induló" hibáknak is, hiszen ezeket a hibákat már a vizsgálat megkezdése előtt előállítottuk.

További hibalehetőség még, hogy a nyomószilárdság-vizsgálat során – az erőnövekedés közben – a vizsgált anyagban lejátszódó elmozdulások szintén nem homogének, ezért a próbatest oldallapjai és élei között elmozdulászkülönbségek jönnek létre. Ezen elmozdulászkülönbségek mértéke nagyban függ attól is, hogy a vizsgálat során ennek hatását miként tudjuk kompenzálni.

Az elmozdulászkülönbségekből adódó excentricitás csökkentésére – esetleg kiküszöbölésére – megfelelő gömbcsukló alkalmazásával sokat lehet tenni.

A felsorolt hibákon javít a gömbcsukló, amelynek révén a behelyezett próbatest a nyomóerő ráengedésekor és a nyomóerő növekedése közben a nyomólapoknak megfelelő helyzetbe kerül, és a nyomóerő fokozása során a nyomóerő koncentrikus helyzete – a lehető legkisebb hibával – biztosítható.

A gömbcsukló nyomószilárdság-vizsgálat közbeni feladatát egy olyan szabályozó szerkezethez lehetne hasonlítani, amely az adott folyamatban folyton az eredő erő centrikusságát „igyekszik" biztosítani.

Ez az „igyekezet" a gömbcsukló érzékenységétől függ. A gömbcsukló akkor érzékeny kis erőkre, illetve kis nyomatékokra akkor fog könnyen elmozdulni – tehát szabályozni –, ha a gömbcsukló mérete és az elcsúszó gömbfelületek – a vizsgálati próbatesthez viszonyítottan – megfelelők.

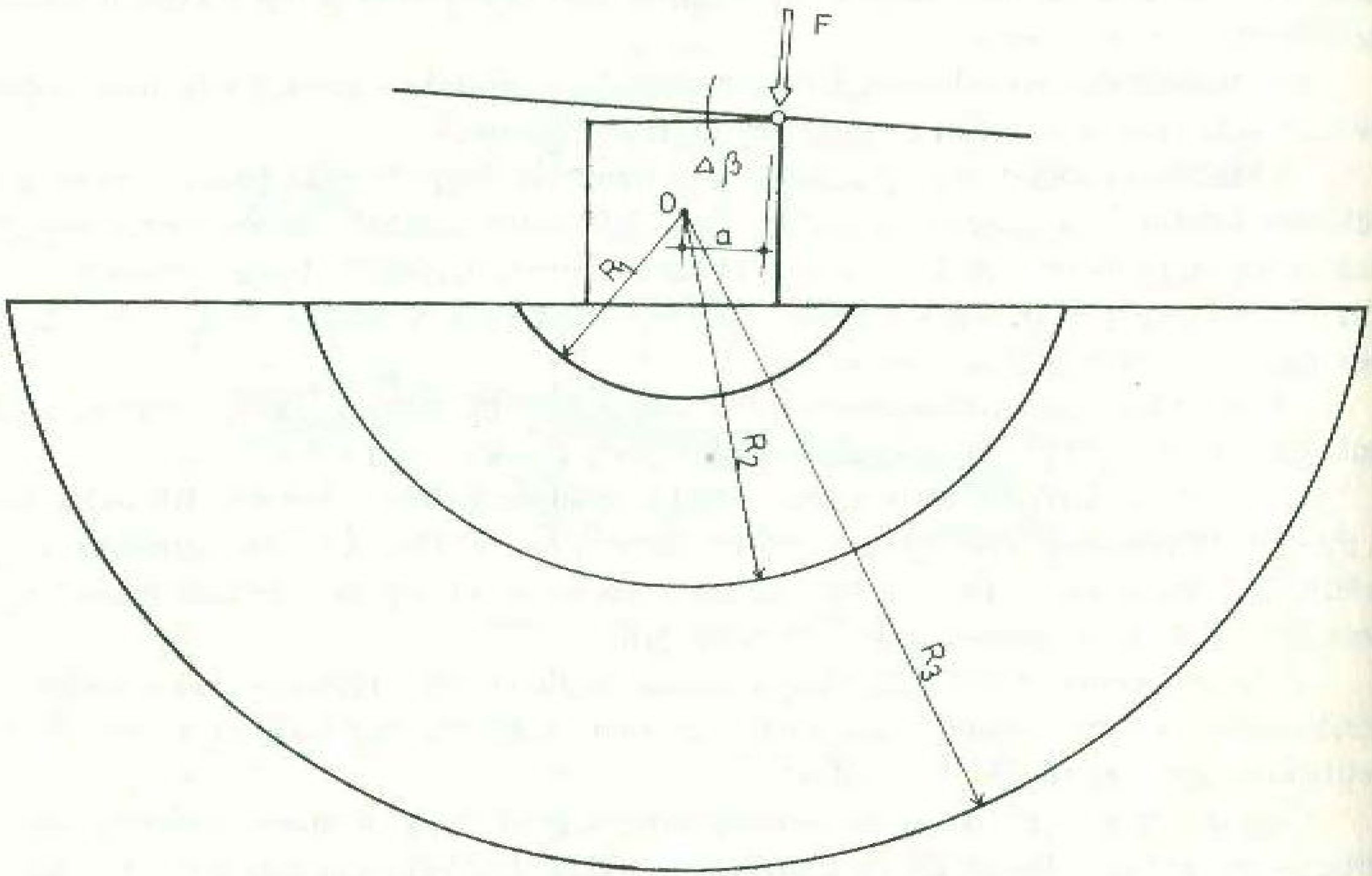
a) 1. A kocka próbatest és a gömbcsukló méretösszefüggéseinek vizsgálata

Vizsgálataink és kísérleteink során a gömbcsukló anyagát, felületi megmunkálását azonosra készítettük. Azonosra állítottuk be továbbá a próbatest felületével érintkező nyomólapok felületi megmunkálását és az elcsúszó gömbfelületek kenését is.

Kiindulási alapnak kívánjuk tekinteni azt a feltételezést is, hogy az általunk vizsgált, szerkesztett és elkészített gömbcsuklók gömbközéppontját minden esetben a vizsgálandó próbatest geometriai középpontjába helyeztük. Megítélésünk szerint ez a legjobban meghatározható olyan pont, amelyen az eredő erőnek át kell mennie, mert a gömbcsukló „szabályozási" feladataiból származóan leghelyesebbnek tartjuk, hogy a nyomóerők eredőjének időközben – a vizsgálat közben – bekövetkezett excentricitását a geometriai és tömegközéppont felé korrigálja.

A fentiek előrebocsátása után a vizsgálatokat kocka- és henger alakú próbatest esetére hajtottuk végre, de az elv minden próbatest alakra azonos.

A *18. ábra* adott próbatestmérethez tartozó három csuklóméretet ábrázol. A felvett csuklóméretek: $R_1 = 5$ cm; $R_2 = 10$ cm; $R_3 = 20$ cm. A próbatest mérete azonos, a fix nyomólap és a próbatest nyomott lapja közötti $\Delta\beta$ szög is azonos, egyetlen változó a gömbfelületnek felvett csukló sugara (R).



18. ábra

Ahhoz, hogy a próbatest a nyomószilárdság vizsgálatakor a megfelelő helyzetbe kerüljön, a fix nyomólap ráengedése után a próbatest felső lapjának $\Delta\beta$ szögforgást kell végeznie. Ahhoz, hogy a szögforgást a próbatest megtegye, az A pontban támadó F erő gömbközéppontra (egyúttal a próbatest geometriai középpontjára) írt nyomatékának le kell győznie a gömbcsukló súrlódási felületei által képviselt – ugyancsak a gömbközéppontra vonatkoztatott – „passzív nyomatékot". Tehát a gömbcsukló által képviselt „passzív nyomaték" nagyságától függ, hogy a próbatest elhelyezkedéséhez milyen nagyságú erő működtetésére van szükség, illetve a „passzív nyomaték" nagysága határozza meg a vizsgálat során „bentmaradó" külpontosság mértékét.

A próbatest elhelyezkedése szempontjából a vizsgálatot két szakaszra bontjuk:

1. Elhelyezkedés a fix nyomólap ráengedésekor (durva elhelyezkedés).
2. A nyomóerő növelése közbeni elhelyezkedés (finom elhelyezkedés).

ad. 1. Vizsgáljuk meg, mi történik a fix nyomólap ráengedésekor. Határozzuk meg tehát a *18. ábrán* látható R_1, R_2 és R_3 sugarú gömbcsukló esetében a „passzív nyomaték" nagyságát. A „passzív nyomaték" értéke függ a súrlódó felületek és a felületre merőleges erők nagyságától, valamint egy tényezőtől (a), amely az anyagminőség és a felületi érdesség függvénye.

A csukló súrlódási felülete gömbsüveg, amelynek felülete:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot m,$$

ahol m = a gömbsüveg magassága,
r = a gömb sugara.

A felvett három csuklóméretheztartozó gömbfelületek nagysága tehát:

$$A_1 = 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 1 = 10 \cdot \pi,$$
$$A_2 = 2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 5{,}5 = 110 \cdot \pi,$$
$$A_3 = 2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 15{,}5 = 620 \cdot \pi.$$

A „passzív nyomaték" a gömb sugarának, $F_\perp$-sel és A-val való szorzata:

$$M_{1P} = 10 \cdot \pi \cdot 5 \cdot F_{\perp 1} \cdot a = 50 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 1},$$
$$M_{2P} = 110 \cdot \pi \cdot 10 \cdot F_{\perp 2} \cdot a = 1100 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 2},$$
$$M_{3P} = 620 \cdot \pi \cdot 20 \cdot F_{\perp 3} \cdot a = 12400 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 3}.$$

Ha a „passzív nyomaték" eredményeit összevetjük, az alábbi arányszámokat kapjuk:

$$\frac{M_{3P}}{M_{1P}} = \frac{12400 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 3}}{50 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 1}} = 248 \frac{F_{\perp 3}}{F_{\perp 1}},$$

$$\frac{M_{2P}}{M_{1P}} = \frac{1100 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 2}}{50 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 1}} = 22 \frac{F_{\perp 2}}{F_{\perp 1}},$$

$$\frac{M_{3P}}{M_{2P}} = \frac{12400 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 3}}{1100 \cdot \pi \cdot a \cdot F_{\perp 2}} = 11{,}3 \frac{F_{\perp 3}}{F_{\perp 2}}.$$

E viszonyszámok azt mutatják, hogy míg a gömbcsukló sugara, 2- illetve 4-szeresére növekszik, addig a „passzív nyomaték" nagysága megközelítőleg 22- illetve 248-szorosára nő. (Tekintve, hogy az $\frac{F_{\perp 3}}{F_{\perp 1}}$ és az $\frac{F_{\perp 2}}{F_{\perp 1}}$ viszonyszám egynél nagyobb érték, ezért az arányok még valamivel nagyobb mérvűek, de összhatásukban véleményünk szerint elhanyagolhatók.)

Ha most a 0 pontban működő F erő nagyságát vizsgáljuk, megállapíthatjuk, hogy azonos karral működő erő – vagyis azonos próbatestnagyság – esetében a „passzív nyomatékok" egyben megadják az egyes esetekben működő F erők viszonyszámait is. (Pl. az R_3 sugarú gömbcsukló esetében 248-szor nagyobb F erő szükséges a $\Delta\beta$ szögforgás létrehozásához, mint R_1 sugarú gömb esetében.)

A próbatest elhelyezkedéséhez szükséges erő nagysága igen fontos, egyrészt mivel erő él vagy sarok mentén nem tud átadódni és ezért a vizsgálandó próbatesten él- vagy sarokcsorbulás keletkezik, már a szilárdság-vizsgálat kezdetén, másrészt, mert a nyomatékminimum fogja meghatározni a vizsgálat során a véglegesen megmaradó külpontosságot, ami a vizsgálati eredmények szórásértékében jelentkezik.

ad. 2. Ezután a nyomóerő fokozódása közbeni elhelyezkedést – a finom elhelyezkedést – vizsgáljuk.

A nyomószilárdság-vizsgálat során a nyomóerő növekedésekor a csúszófelületre merőleges F erő nagysága is jelentősen növekszik. Azonos törőerő esetében nagyobb sugarú gömbcsuklóhoz kisebb felületegységre jutó merőleges erő (F_1) tartozik.

Pl: 500 kN törőerejű próbatest esetén az R_1 és R_2 csukló felületére átadódó F erőből a csukló felületegységére jutó F_{egys} erő mérőszámai:

$$\frac{500}{2800} = 0{,}18 \text{ kN/mm}^2 \ (180 \text{ N/mm}^2),$$

$$\frac{500}{126000} = 0{,}004 \text{ kN/mm}^2 \ (4 \text{ N/mm}^2),$$

vagyis a gömbcsukló sugarának csökkentésével az erőnövekedés során a súrlódó felületekre merőleges felületegységre jutó erők nagymértékben növekszenek, ami a gömbcsukló vizsgálat közbeni „érzékenységét" egy bizonyos, az anyagjellemzők által meghatározott határon túl rontja.

A nyomószilárdság-vizsgálathoz használt gömbcsukló méreteinek meghatározásánál tehát két tendencia érvényesül:

– A gömbcsukló sugarának csökkentésével a vizsgálat kezdetekor nő a csukló érzékenysége, vagyis a kisebb sugarú gömbcsukló az erő ráengedésekor érzékenyebben áll be a próbatest fix nyomólapjának megfelelően.

– A nyomóerő növekedése közbeni állapot szempontjából nem előnyös a gömbcsukló sugarát bizonyos mértéken túl csökkenteni.

Az előzőekben leírt változók különböző mértékben befolyásolják a vizsgált anyag nyomószilárdságát. E befolyásolás mértékének meghatározására kísérleteket végeztünk, amelyeknek körülményeit és eredményeit a továbbiakban ismertetünk.

4. VIZSGÁLATI FELTÉTELEK ÉS AZ ANYAGOK NYOMÓSZILÁRDSÁGÁNAK ÖSSZEFÜGGÉSEI

A kísérletek során a próbatestek élhosszúságának és a gömbcsukló sugarának összefüggéseit kívántuk tisztázni, illetve azt az elsőrendű problémát, hogy az azonos anyagból készült különböző méretű próbatesteken mért nyomószilárdsági értékek milyen módon viszonyulnak egymáshoz, ha a vizsgálati feltételek közül a próbatestnek a gömbcsuklón való elhelyezkedését és a nyomólap minőségét is azonosra állítjuk.

Ezen fő kérdések tisztázásához 1; 2; 4; 7; 10; és 20 cm élhosszúságú kocka illetve azonos átmérőjű henger próbatesteket készítettünk. A henger próbatestek átmérője azonos volt a magassággal. A próbatest anyagának azonos minőségben való tartására az alábbi feltételeket tartottuk szem előtt:

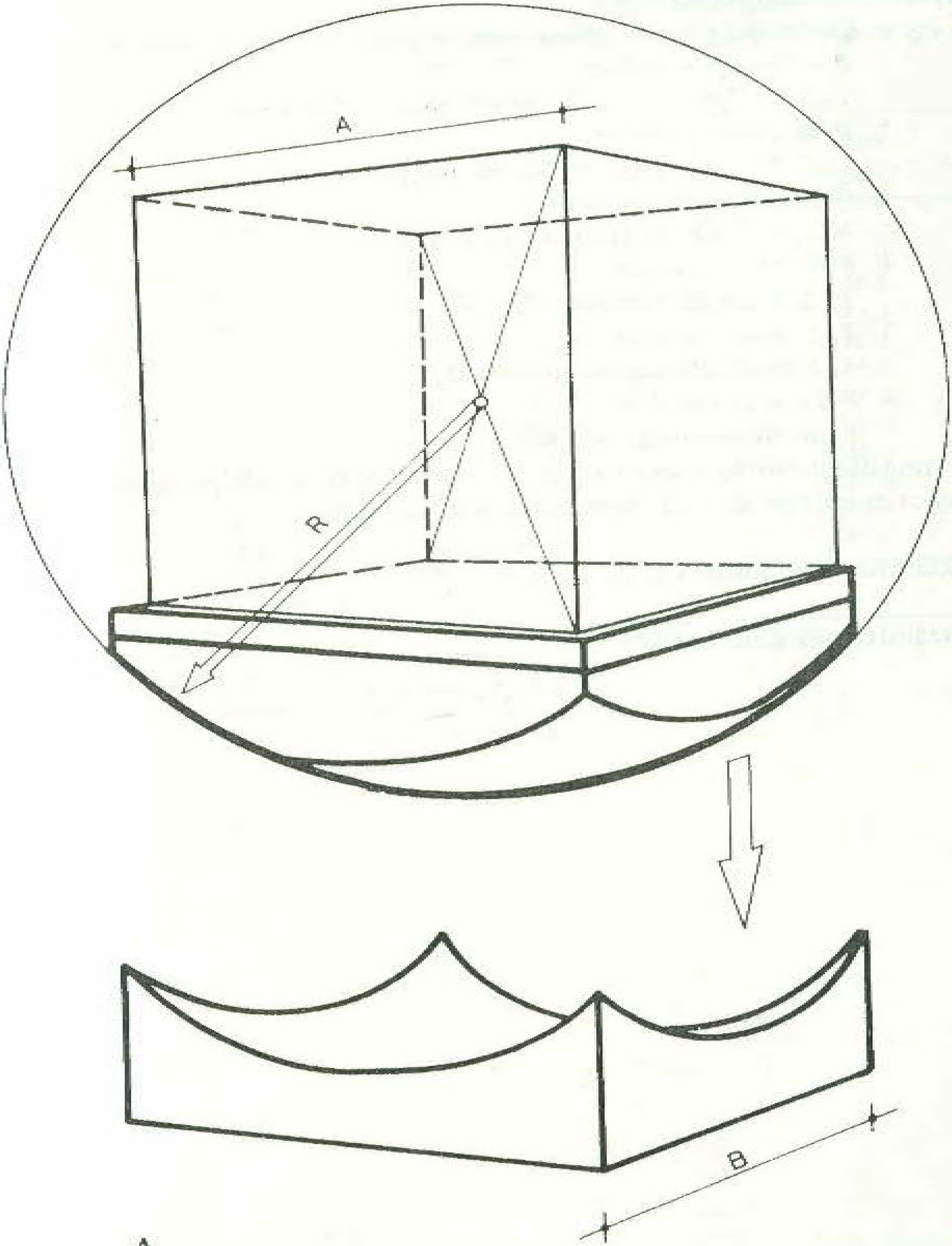
Egy azonos keverőben azonos mennyiségű és összetételű anyagot kevertünk, mely 3 súlyrész tatai 350-es cementből, 1 súlyrész 00 jelű illetve 1-3 mm-es frakcióhatárú belga normálhomokból állt. A konzisztencia kissé folyós volt kimondottan abból a célból, hogy az egyes próbatestek ne igényeljenek külön bedolgozási energiát, mert azok fajlagos azonosítása nehézségekbe ütközött volna.

Egy keverékből készült mindig minden méretű próbatest. A keveréket a sablonokba beöntöttük, elsimítottuk és azonnal klímakamrába helyeztük. Egy napos korban kizsaluztuk, 28 napos korig tároltuk és a próbatesteket a klímakamrából a törés-kor egyenként szállítottuk ki a gépterembe.

A kísérletekhez azonos minőségű fémből gömbcsuklókat szerkesztettünk 1; 2; 4; 7,07; 10 és 20 cm-es sugárral oly módon, hogy ha a sugárral azonos élhosszúságú kockát vagy hengert a gömbcsuklóra helyeztük, akkor a gömbközéppont és a próbatest geometriai középpontja egybe essék *(19. ábra)*.

A gömbcsuklóhoz tartozó nyomólapokat azonos anyagból a próbatesttel érintkező felületét azonosan megmunkálva és edzve képeztük ki.

Törekedve arra, hogy a próbatest élhosszúsága illetve átmérője és a gömbcsukló mérete legyen csak változó a vizsgálat során, a többi körülmény pedig a legnagyobb mértékben azonosnak tekinthető, az alábbi kísérleti programot hajtottuk végre:



$$\left.\begin{matrix}\frac{A}{R} = \\ \frac{B}{R} = \end{matrix}\right\} = \text{constans}$$

19. ábra

Nyomószilárdság-vizsgálatok:

minden egyes élhosszúsághoz és töréseredményhez 12-12 db próbatest tartozik.

1. *Ø 40 cm-es csuklón*

   1; 2; 4; 7,07; 10 és 20 cm élhosszúságú kockák.

2. *Ø 20 cm-es csuklón*

   1; 2; 4; 7,07 és 10 cm élhosszúságú kockák.

3. *Ø 14.14 cm-es csuklón*

   1; 2; 4; 7,07 cm élhosszúságú kockák.

4. *Ø 8 cm-es csuklón*

   1; 2; 4 cm élhosszúságú kockák.

5. *Ø 4 cm-es csuklón*

   1; 2 cm-es élhosszúságú kockák.

6. *Ø 2 cm-es csuklón*

   1 cm élhosszúságú kockák.

A vizsgálatok során kapott egyes nyomószilárdsági eredményeket, az ebből számolt átlagot és szórást az *1-21. táblázatokban* közöljük.

Az átlagszámítás alkalmazott képlete: $\sigma' = \frac{\sum_{1-n} \sigma}{n}$.

A szórásszámítás alkalmazott képlete:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{1-n} (\sigma - \sigma')^2}{n-1}}.$$

1. táblázat

Ø 40 cm-es gömbcsukló
1 x 1 x 1 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	0,02	4250	42,5
2	0,02	3000	30,0
3	0,02	5000	50,0
4	0,02	4250	42,5
5	0,02	3250	32,5
6	0,02	2000	20,0
7	0,02	2500	25,0
8	0,02	4500	45,0
9	0,02	3500	35,0
10	0,02	2500	25,0
11	0,02	4250	42,5
12	0,02	3750	37,5
0,02-0,205 között			

σ átl. = 35,6 N/mm^2
szórás (s) = 9,9 N/mm^2 (28%)
Térfogatsúly: 20,00-20,50 kN/m^3 érték között

2. táblázat

Ø40 cm-es gömbcsukló
2 x 2 x 2 cm³ méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm²)
1	0,164	16 000	40,0
2	0,164	19 000	47,5
3	0,164	13 500	33,8
4	0,164	16 500	41,2
5	0,164	14 500	36,2
6	0,164	14 250	35,6
7	0,164	17 500	43,8
8	0,164	19 000	47,5
9	0,164	16 500	41,2
10	0,164	18 500	46,2
11	0,164	14 500	36,2
12	0,164	17 500	43,8
	0,163-0,165 között		

σ átl. = 41,1 N/mm²
szórás (s) = 4,8 N/mm² (12%)
Térfogatsúly: 20,38-20,62 kN/m³ érték között

3. táblázat

Ø 40 cm-es gömbcsukló
4 x 4 x 4 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	1,325	80 000	50,0
2	1,325	90 000	56,2
3	1,325	67 500	42,2
4	1,325	70 000	43,8
5	1,325	85 000	53,1
6	1,325	72 500	45,3
7	1,325	76 500	47,8
8	1,325	82 500	51,6
9	1,325	70 000	43,8
10	1,325	87 500	54,7
11	1,325	67 500	42,2
12	1,325	77 500	48,4
	1,31-1,33 között		

σ átl. = 48,3 N/mm^2
szórás (s) = 4,9 N/mm^2 (10%)
Térfogatsúly: 20,47-20,78 kN/m^3 érték között

4. táblázat

Ø 40 cm-es gömbcsukló
7,07 x 7,07 x 7,07 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	7,40	212 500	42,5
2	7,40	250 000	50,0
3	7,40	230 000	46,0
4	7,40	300 000	60,0
5	7,40	277 500	55,5
6	7,40	220 000	44,0
7	7,40	235 000	47,0
8	7,40	247 500	49,5
9	7,40	265 000	53,0
10	7,40	230 000	46,0
11	7,40	255 000	51,0
12	7,40	247 500	49,5
	7,35-7,50 között		

σ átl. = 49,5 N/mm^2
szórás (s) = 5,0 N/mm^2 (10%)
Térfogatsúly: 20,80-21,22 kN/m^3 érték között

5. táblázat

Ø40 cm-es gömbcsukló
10 x 10 x 10 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	20,50	542 500	54,2
2	20,50	542 500	54,2
3	20,50	517 500	51,8
4	20,50	580 000	58,0
5	20,50	522 500	52,2
6	20,50	580 000	58,0
7	20,50	532 500	53,2
8	20,50	545 000	54,5
9	20,50	515 000	51,5
10	20,50	567 500	56,8
11	20,50	578 000	57,8
12	20,50	565 000	56,5
	20,40-20,65 között		

σ átl. = 54,9 N/mm^2
szórás (s) = 2,5 N/mm^2 (5%)
Térfogatsúly: 20,40-20,65 kN/m^3 érték között

6. táblázat

∅ 40 cm-es gömbcsukló
20 x 20 x 20 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	Ø ny (N/mm^2)
1	166,80	2 360 000	59,3
2	165,36	2 375 000	59,4
3	166,16	2 380 000	59,6
4	167,76	2 365 000	59,4
5	163,76	2 380 000	59,1
6	163,76	2 350 000	58,2
7	165,52	2 370 000	59,3
8	166,96	2 365 000	59,6
9	167,20	2 360 000	59,7
10	165,76	2 370 000	60,1
11	165,92	2 350 000	59,2
12	168,56	2 375 000	59,8

σ átl. = 59,4 N/mm^2

szórás (s) = 0,4 N/mm^2 (0,6%)

Térfogatsúly: 20,46-21,07 kN/m^3 érték között

7. táblázat

Ø20 cm-es gömbcsukló
1 x 1 x 1 cm^3 méretű kockán

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	0,02	3000	30,0
2	0,02	3000	30,0
3	0,02	5000	50,0
4	0,02	3000	30,0
5	0,02	2750	27,5
6	0,02	4750	47,5
7	0,02	3500	35,0
8	0,02	2000	20,0
9	0,02	3250	32,5
10	0,02	3500	35,0
11	0,02	2750	27,5
12	0,02	3250	32,5
	0,02-0,021 között		

σ átl. = 33,1 N/mm^2

szórás (s) = 8,8 N/mm^2 (27%)

Térfogatsúly: 20,00-21,00 kN/m^3 érték között

8. táblázat

∅20 cm-es gömbcsukló
2 x 2 x 2 cm³ méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm²)
1	0,164	16 500	41,2
2	0,164	14 000	35,0
3	0,164	17 500	43,8
4	0,164	16 500	41,2
5	0,164	13 500	33,8
6	0,164	16 000	40,0
7	0,164	18 000	45,0
8	0,164	17 500	43,8
9	0,164	18 500	46,2
10	0,164	17 000	42,5
11	0,164	16 000	40,0
12	0,164	17 500	43,8
	0,163-0,165 között		

σ átl. = 41,4 N/mm²

szórás (s) = 3,8 N/mm² (9%)

Térfogatsúly: 20,38-20,62 kN/m³ érték között

9. táblázat

ϕ 20 cm-es gömbcsukló
4 x 4 x 4 cm³ méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm²)
1	1,325	61 000	38,1
2	1,325	82 500	51,6
3	1,325	56 000	35,0
4	1,325	52 000	32,5
5	1,325	85 000	53,1
6	1,325	66 000	41,2
7	1,325	87 500	54,7
8	1,325	58 000	36,2
9	1,325	55 000	34,4
10	1,325	76 500	47,8
11	1,325	82 500	51,6
12	1,325	62 000	38,8
	1,31-1,33 között		

σátl. = 42,9 N/mm²

szórás (s) = 8,3 N/mm² (19%)

Térfogatsúly: 20,47-20,78 kN/m³ érték között

10. táblázat

Ø 20 cm-es gömbcsukló
7,07 x 7,07 x 7,07 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	Ø ny (N/mm^2)
1	7,40	272 000	54,4
2	7,40	271 000	54,2
3	7,40	285 000	57,0
4	7,40	284 000	56,8
5	7,40	274 000	54,8
6	7,40	262 000	52,4
7	7,40	258 000	51,6
8	7,40	266 000	53,2
9	7,40	274 000	54,8
10	7,40	267 000	53,4
11	7,40	263 000	52,6
12	7,40	275 000	55,0
	7,35-7,50 között		

σ átl. = 5,42 N/mm^2
szórás (s) = 1,7 N/mm^2 (3%)
Térfogatsúly: 20,80-21,22 kN/mm^3 érték között

11. táblázat

Ø 20 cm-es gömbcsukló
10 x 10 x 10 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	20,50	580 000	58,0
2	20,50	580 000	58,0
3	20,50	570 000	57,0
4	20,50	565 000	56,5
5	20,50	560 000	56,0
6	20,50	565 000	56,5
7	20,50	570 000	57,0
8	20,50	565 000	56,5
9	20,50	567 500	56,8
10	20,50	572 500	57,2
11	20,50	577 500	57,8
12	20,50	575 000	57,5
	20,40-20,65 között		

σ átl. = 57,1 N/mm^2
szórás (s) = 0,7 N/mm^2 (1%)
Térfogatsúly: 20,40-20,65 kN/m^3 érték között

12. táblázat

Ø 14,14 cm-es gömbcsuklón
1 x 1 x 1 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	0,02	4750	47,5
2	0,02	3250	32,5
3	0,02	3500	35,0
4	0,02	4000	40,0
5	0,02	2500	25,0
6	0,02	3250	32,5
7	0,02	4000	40,0
8	0,02	3500	35,0
9	0,02	4250	42,5
10	0,02	2500	25,0
11	0,02	3000	30,0
12	0,02	2500	25,0
	0,02-0,021 között		

σ átl. = 34,2 N/mm^2
szórás (s) = 7,4 N/mm^2 (22%)
Térfogatsúly: 20,00-21,00 kN/m^3 érték között

13. táblázat

Ø 14,14 cm-es gömbcsuklón
2 x 2 x 2 cm^3-es méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	0,164	15 200	38,0
2	0,164	14 500	36,2
3	0,164	16 700	41,8
4	0,164	19 000	47,5
5	0,164	19 500	48,8
6	0,164	16 000	40,0
7	0,164	18 000	45,0
8	0,164	17 500	43,8
9	0,164	16 500	41,2
10	0,164	18 700	46,8
11	0,164	16 900	42,2
12	0,164	17 000	42,5
	0,163-0,168 között		

σ átl. = 42,8 N/mm^2
szórás (s) = 3,8 N/mm^2 (9%)
Térfogatsúly: 20,38-21,00 kN/m^3 érték között

14. táblázat

Ø 14,14 cm-es gömbcsuklón
4 x 4 x 4 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	1,325	72 000	45,0
2	1,325	80 000	50,0
3	1,325	76 000	47,5
4	1,325	91 000	56,9
5	1,325	79 000	49,4
6	1,325	82 000	51,2
7	1,325	81 000	50,6
8	1,325	78 000	48,8
9	1,325	88 000	55,0
10	1,325	90 000	56,2
11	1,325	79 000	49,4
12	1,325	76 000	47,5
	1,31-1,33 között		

σ átl. = 50,6 N/mm^2
szórás (s) = 3,7 N/mm^2 (7%)
Térfogatsúly: 20,47-20,78 kN/m^3 érték között

15. táblázat

Ø 14,14 cm-es gömbcsuklón
7,07 x 7,07 x 7,07 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	7,40	280 000	56,0
2	7,40	285 000	57,0
3	7,40	272 000	54,4
4	7,40	273 000	54,2
5	7,40	275 000	54,2
6	7,40	272 000	54,1
7	7,40	274 000	54,2
8	7,40	272 500	54,1
9	7,40	283 000	56,6
10	7,40	285 000	57,0
11	7,40	285 000	57,0
12	7,40	278 000	55,6
	7,35-7,50 között		

σ átl. = 55,4 N/mm^2
szórás (s) = 1,3 N/mm^2 (2%)
Térfogatsúly: 20,80-21,22 kN/m^3 érték között

Ø 8 cm-es gömbcsukló
1 x 1 x 1 cm³ méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm²)
1	0,02	3500	35,0
2	0,02	3000	30,0
3	0,02	4750	47,5
4	0,02	4000	40,0
5	0,02	3500	35,0
6	0,02	4000	40,0
7	0,02	3000	30,0
8	0,02	3750	37,5
9	0,02	4250	42,5
10	0,02	3500	35,0
11	0,02	4500	45,0
12	0,02	3250	32,5
	0,02-0,021 között		

σ átl. = 37,5 N/mm²

szórás (s) = 5,6 N/mm² (15%)

Térfogatsúly: 20,00-21,00 kN/m³ érték között

17. táblázat

∅ 8 cm-es gömbcsukló
2 x 2 x 2 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	0,164	19 500	48,8
2	0,164	16 000	40,0
3	0,164	18 000	45,0
4	0,164	19 000	47,5
5	0,164	17 500	43,8
6	0,164	16 000	40,0
7	0,164	19 000	47,5
8	0,164	17 000	42,5
9	0,164	20 000	50,0
10	0,164	16 500	41,2
11	0,164	17 750	44,4
12	0,164	18 500	46,2
	0,163-0,165 között		

σ átl. = 44,7 N/mm^2

szórás (s) = 3,2 N/mm^2 (7%)

Térfogatsúly: 20,38-20,62 kN/m^3 érték között

Ø 8 cm-es gömbcsukló
4 x 4 x 4 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm^2)
1	1,325	86 000	53,8
2	1,325	87 250	54,5
3	1,325	90 000	56,2
4	1,325	90 000	56,2
5	1,325	87 500	54,7
6	1,325	85 000	53,1
7	1,325	87 500	54,7
8	1,325	90 000	56,2
9	1,325	90 000	56,2
10	1,325	88 750	55,5
11	1,325	87 500	54,7
12	1,325	88 000	55,0
		1,31-1,33 között	

σ átl. = 55,1 N/mm^2
szórás (s) = 1,0 N/mm^2 (2%)
Térfogatsúly: 20,47-20,78 kN/m^3 érték között

19. táblázat

Ø 4 cm-es gömbcsukló
1 x 1 x 1 cm^3 méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	Ø ny (N/mm^2)
1	0,02	4800	48,0
2	0,02	5000	50,0
3	0,02	4700	47,0
4	0,02	5100	51,0
5	0,02	5000	50,0
6	0,02	4900	49,0
7	0,02	5200	52,0
8	0,02	4600	46,0
9	0,02	5100	51,0
10	0,02	5000	50,0
11	0,02	4700	47,0
12	0,02	4800	48,0

0,02-0,021 között

σ átl. = 49,1 N/mm^2

szórás (s) = 1,9 N/mm^2 (4%)

Térfogatsúly: 20,00-21,00 kN/m^3 érték között

ϕ 4 cm-es gömbcsukló
2 x 2 x 2 cm³ méretű kocka

Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm²)
1	0,164	21 600	54,0
2	0,164	22 100	55,2
3	0,164	23 400	58,5
4	0,164	22 600	56,5
5	0,164	21 800	54,5
6	0,164	21 300	53,2
7	0,164	22 800	57,0
8	0,164	22 400	56,0
9	0,164	21 700	54,2
10	0,164	23 200	58,0
11	0,164	22 700	56,8
12	0,164	22 600	56,5
	0,163-0,165 között		

σ átl. = 55,9 N/mm²

szórás (s) = 1,7 N/mm² (3%)

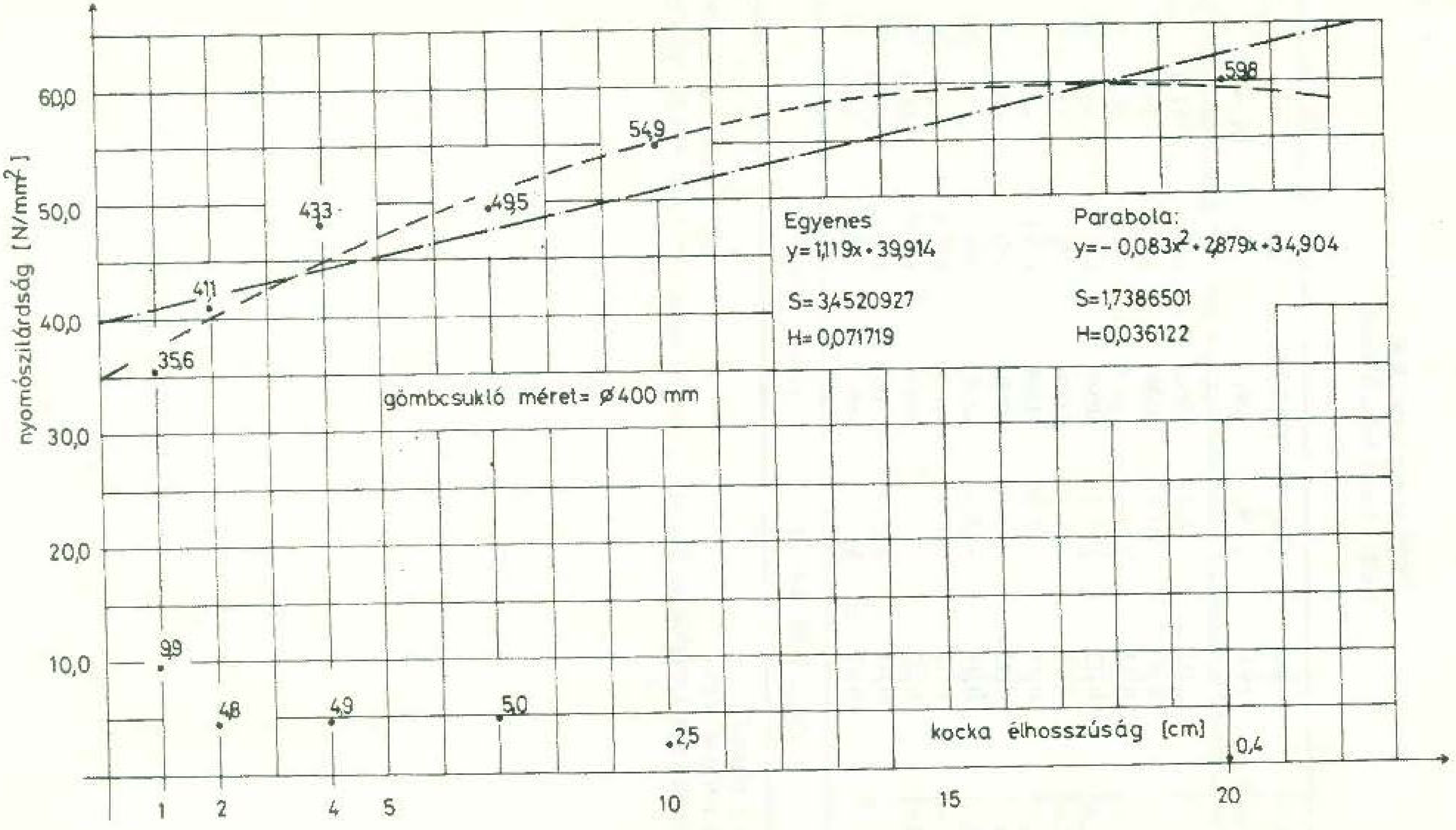
Térfogatsúly: 20,38-20,62 kN/m³ érték között

21. táblázat

ϕ 2 cm-es gömbcsukló
1 x 1 x 1 cm³ méretű kocka

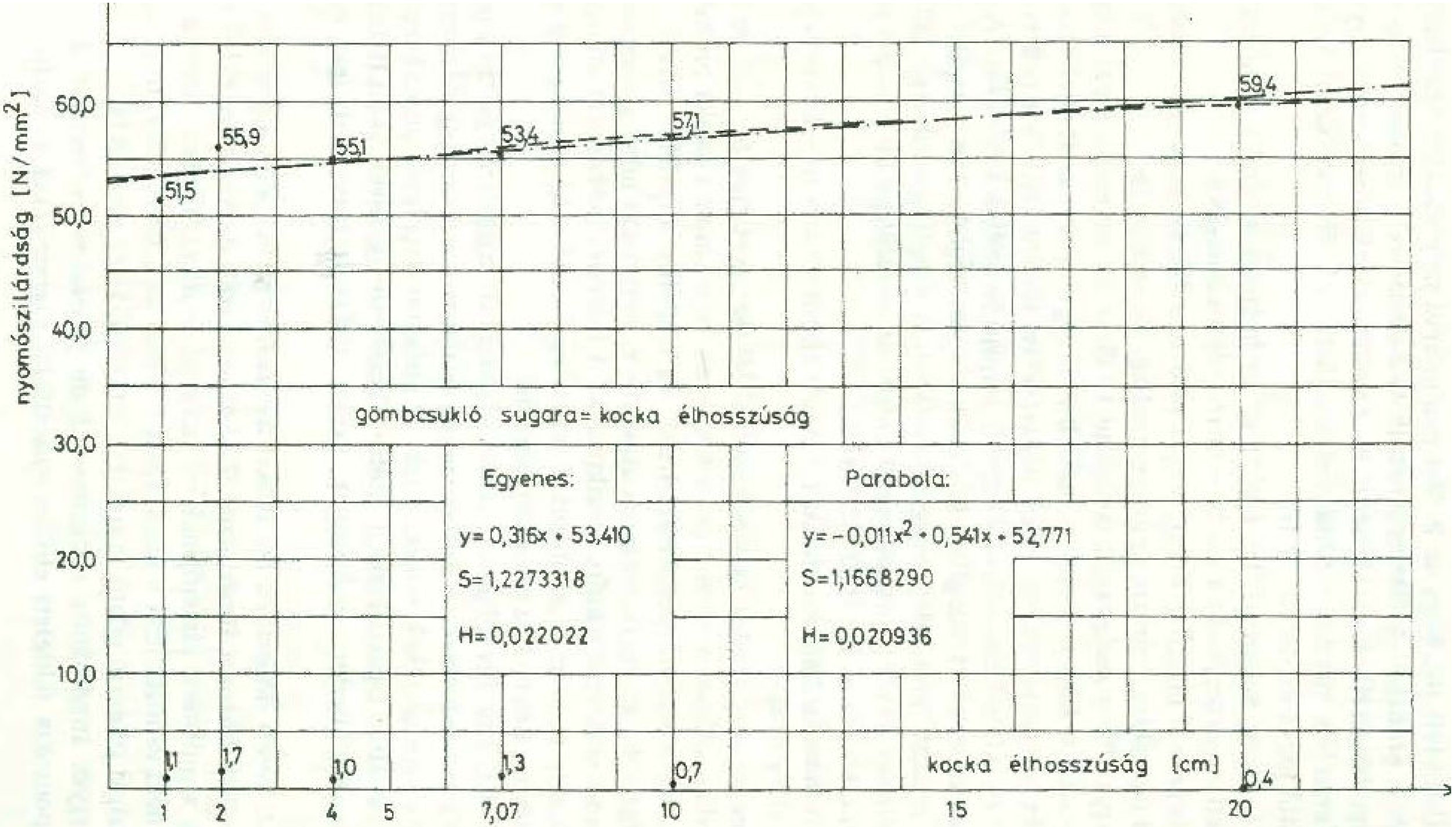
Jel	Súly (N)	Törőerő (N)	σ ny (N/mm²)
1	0,02	5100	51,0
2	0,02	5000	50,0
3	0,02	5200	52,0
4	0,02	5050	50,5
5	0,02	5200	52,0
6	0,02	5100	51,0
7	0,02	5000	50,0
8	0,02	5250	52,5
9	0,02	5100	51,0
10	0,02	5300	53,0
11	0,02	5200	52,0
12	0,02	5300	53,0
	0,02-0,021 között		

σ átl. = 51,5 N/mm²
szórás (s) = 1,1 N/mm² (2%)
Térfogatsúly: 20,00-21,00 kN/m³ érték között



20. ábra

A kockaszilárdság a kockaélhossz és a gömbcsukló méretének függvényében



21. ábra
A kockaszilárdság a kockaélhossz és a gömbcsukló méretének függvényében

A kísérletek során mért eredményeket dolgoztuk fel a *20.* és *21. ábrán.*

Az ábrán látható, hogy az Ø 400 mm méretű gömbcsuklón végrehajtott vizsgálatok esetén a próbatestek élhosszúságának csökkentésével — azonos anyag esetén is — a szilárdsági átlagértékek csökkennek, és a szórásértékek növekszenek. Gyakorlatilag a Halász-Tevan-féle kísérleti eredményekhez, illetve a L' Hermite kísérleti eredményeihez hasonlító képet kaptunk. [3] [4]

A *21. ábrán* dolgoztuk fel azokat az eredményeket, ahol a gömbcsukló sugara minden esetben megegyezett a kocka próbatest élhosszúságával.

Az eredményekből megállapítható, hogy a próbatest élhosszúságának változásával csak nagyon kis mértékben változik az átlagszilárdság, illetve a szórás.

Az egyes élhosszúságokhoz tartozóan 12 db próbatest eredményét dolgoztuk fel. Ezekre a pontokra fektetett első- és másodfokú függvényeket az ábrán feltüntettük.

Kocka próbatestnek az előző fejezetekben történt leírás szerinti vizsgálatát a *21. ábrán* feltüntetett másodfokú függvény alapján javasoljuk kiértékelni. A jelen kiadványunkban ismertetett vizsgálati feltételek alapján végrehajtott vizsgálat a nevezett függvény „szerint" szól bele a vizsgálai értékben, a vizsgálati eredmény „többi része" anyagra jellemző érték. E megállapítást erősíti az összefüggés biztonságát jól kifejező relatív hiba értéke, ami: H = 0,022022 értékű.

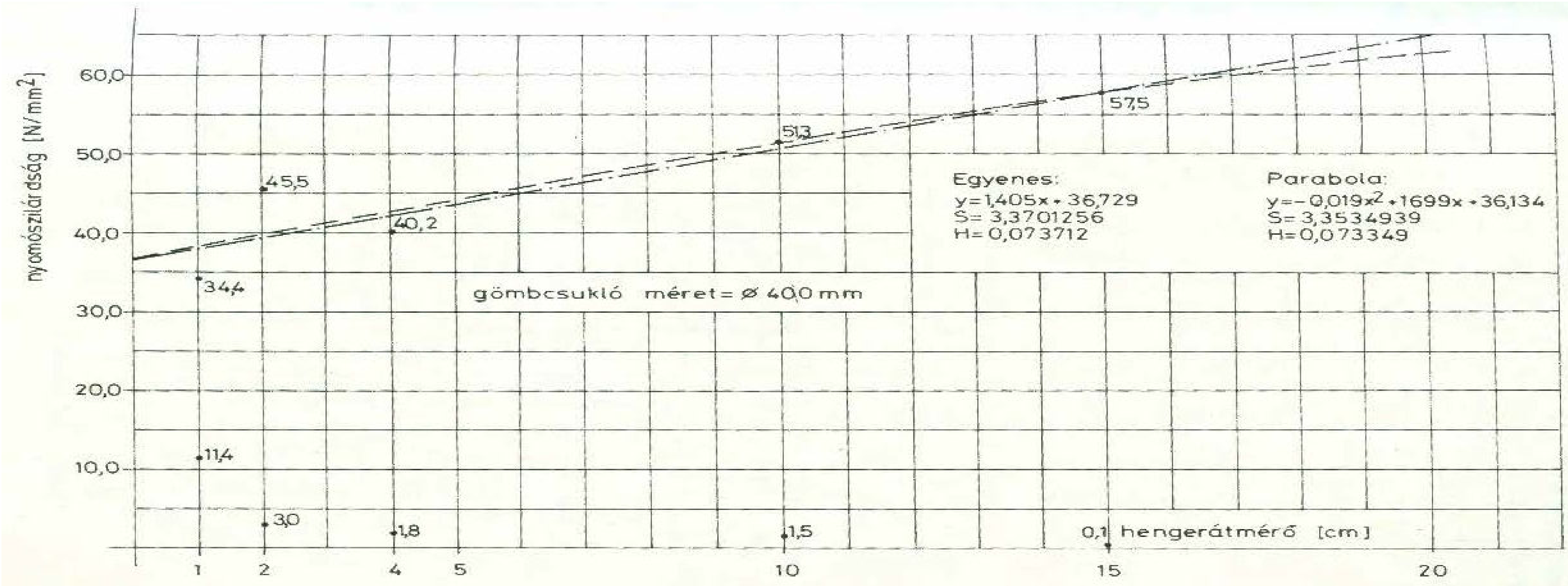
A nyomószilárdsági kísérleteket — a leírt alapelvek szerint — henger alakú próbatestekre is elvégeztük.

A henger próbatestek esetén kapott értékeket mutatjuk be a *22.* és *23. ábrán.* A kísérleteket teljesen azonos módon hajtottuk végre, mint a kocka próbatestek esetén, így az egyes eredmények ismertetését — a kiadvány terjedelme miatt — nem tartjuk szükségesnek. Az egyes hengerek átmérője és magassága mindig azonos volt, így a feldolgozásnál csak az átmérőre hivatkozunk. A hengeres próbatestek előnyére szolgál az a körülmény is, hogy a gömbcsukló sugara az átmérő 0,85 szorosa lehetett, mert a próbatest így is „belefért" a befogtató gömbbe.

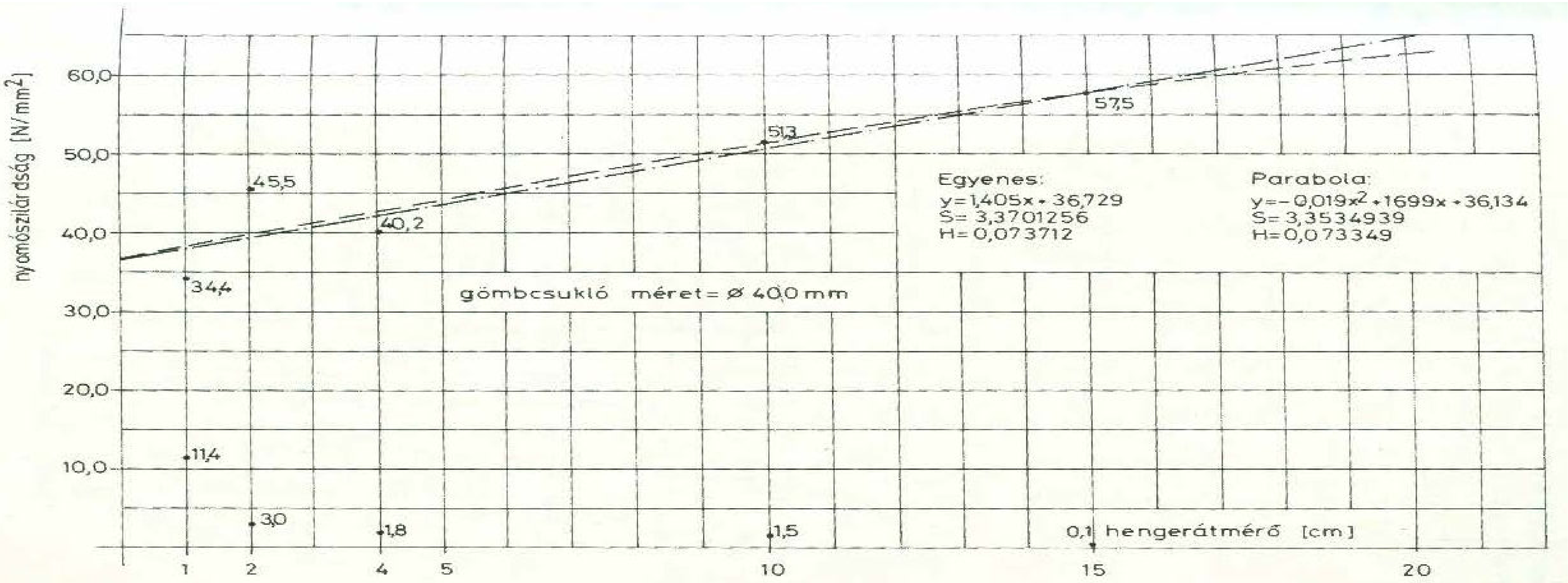
Az Ø 400 mm méretű gömbcsuklón végrehajtott vizsgálatok esetén a próbatestek átmérőjének csökkenésével — azonos anyag esetén is — a szilárdsági átlagértékek csökkennek és a szórásértékek növekszenek. A kialakult kép tehát praktikusan azonos a kocka próbatestnél tapasztaltakkal, illetve a korábban már hivatkozott Halász-Tevan és L' Hermite-féle kísérleti eredmények alapján kialakult helyzettel, igaz mértékében azért eltér.

A *23. ábrán* dolgoztuk fel azokat az eredményeket, ahol a gömbcsukló sugara minden esetben a henger átmérőjének 0,85-szorosa volt. Az eredményekből megállapítható, hogy a próbatest átmérőjének változásával az átlagszilárdság, illetve a szórás gyakorlatilag nem változik. Ezt a megállapítást erősíti az a körülmény, hogy az összefüggés biztonságát jellemző relatív szórás (H = 0,005306) igen szép érték.

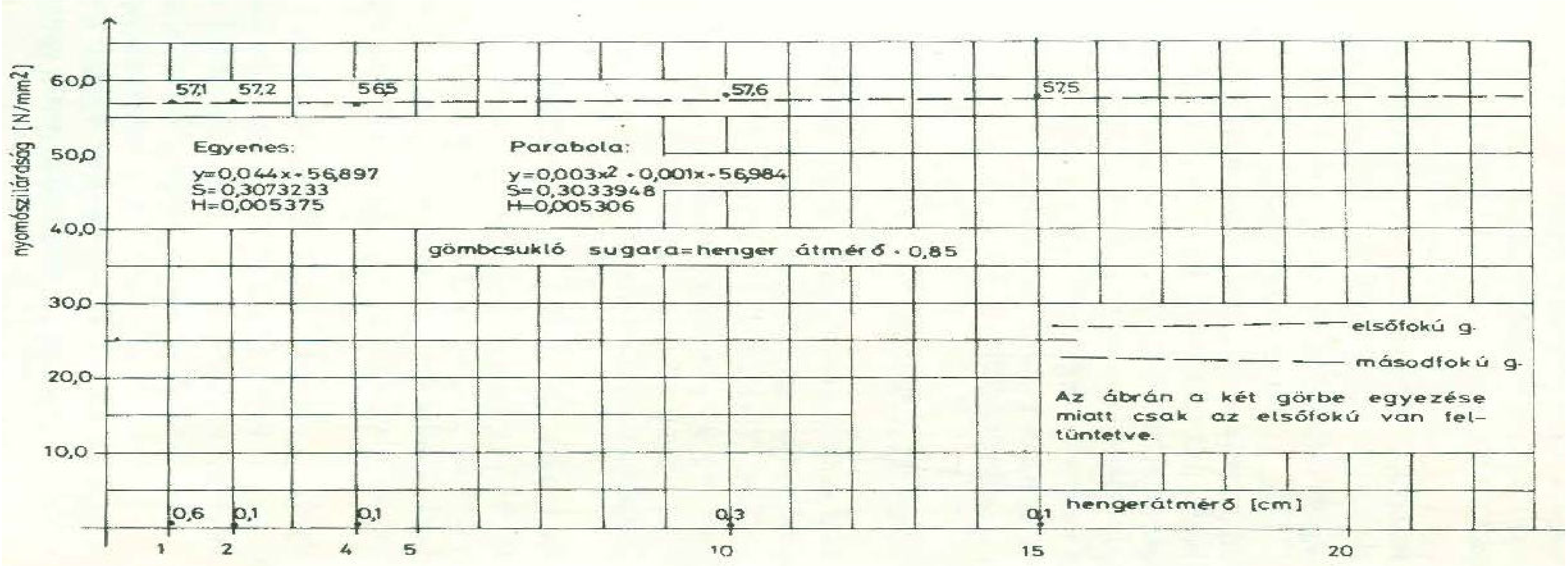
Az egyes átmérőkhöz tartozóan 12 db próbatest eredményét dolgoztuk fel. Ezekre a pontokra fektetett első és másodfokú függvényeket az ábrán feltüntettük.



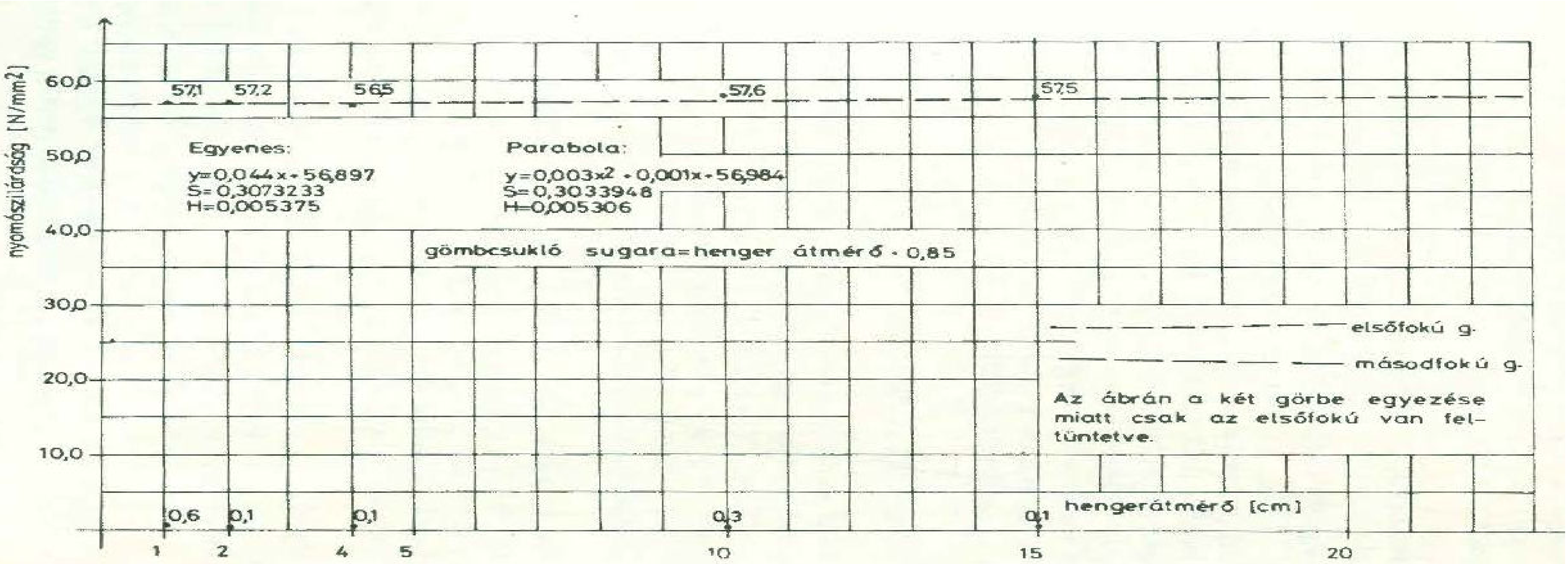
22. ábra
Hengerszilárdság az átmérő és a gömbcsukló méretének függvényében



22. ábra
Hengerszilárdság az átmérő és a gömbcsukló méretének függvényében



23. ábra
Hengerszilárdság az átmérő és a gömbcsukló méretének függvényében



23. ábra
Hengerszilárdság az átmérő és a gömbcsukló méretének függvényében

A henger próbatesteknek az előző fejezetben történt leírás szerinti vizsgálatát a *23. ábrán* feltüntetett elsőfokú függvény alapján javasoljuk kiértékelni.

Terjedelmi okok miatt nem kívánjuk ismertetni, csupán megállapításként adjuk közre, hogy a 3 mm max. szemnagyságú anyag esetén hasonló eredményeket kaptunk, és mindezeket figyelembe véve tesszük további megállapításainkat.

Az elvégzett vizsgálatok, kísérleti eredmények alapján a próbatestméretekhez tartozó átszámítási értéket a *22. táblázatban* adjuk meg.

22. táblázat

Kocka próbatest

Élhosszúság (mm)	20	50	70,7	100	150	200
a	1,08	1,07	1,06	1,04	1,01	1,00

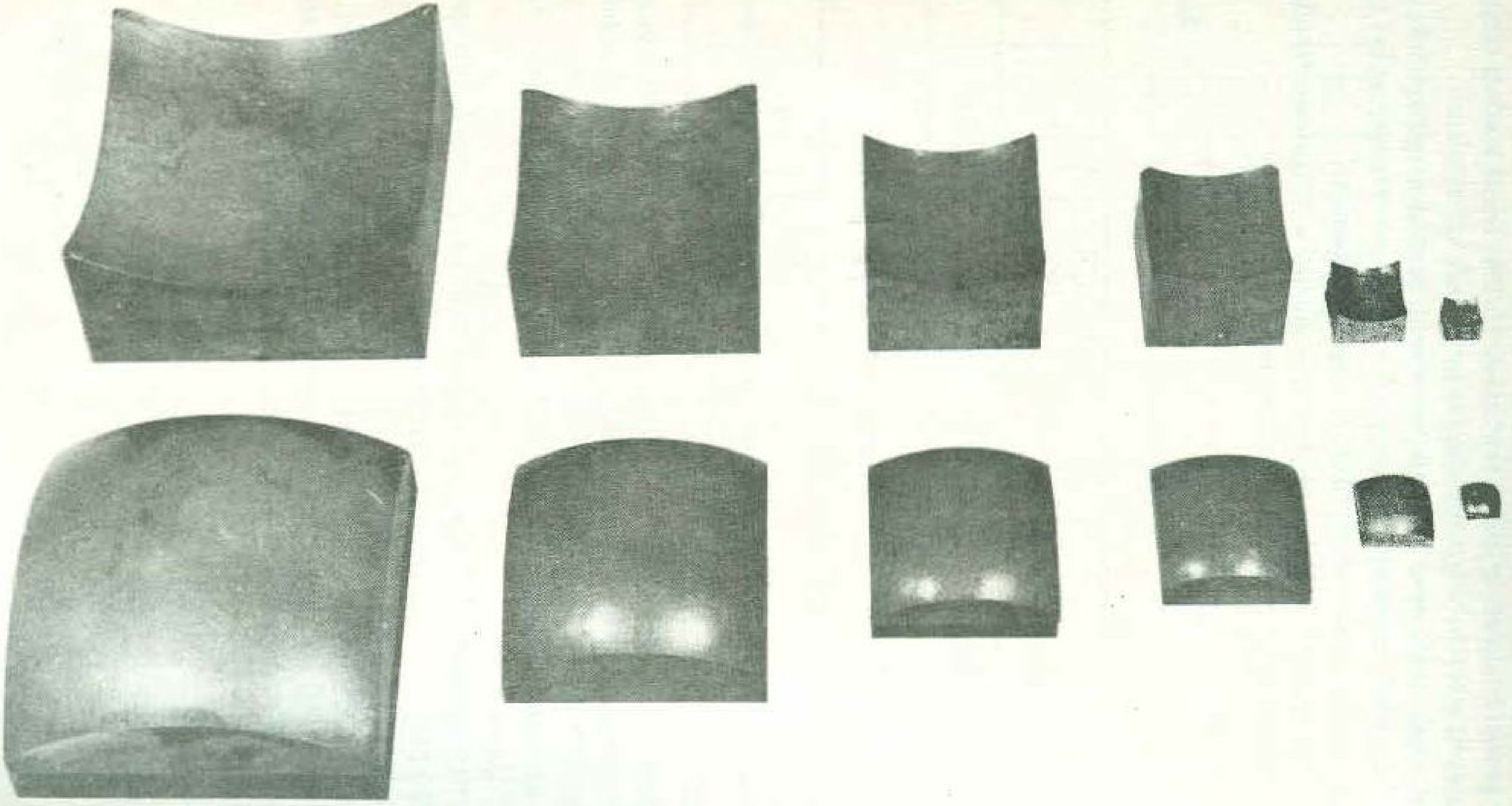
Henger próbatest 1:1

átmérő (mm)	20	50	70	100	150
a	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00

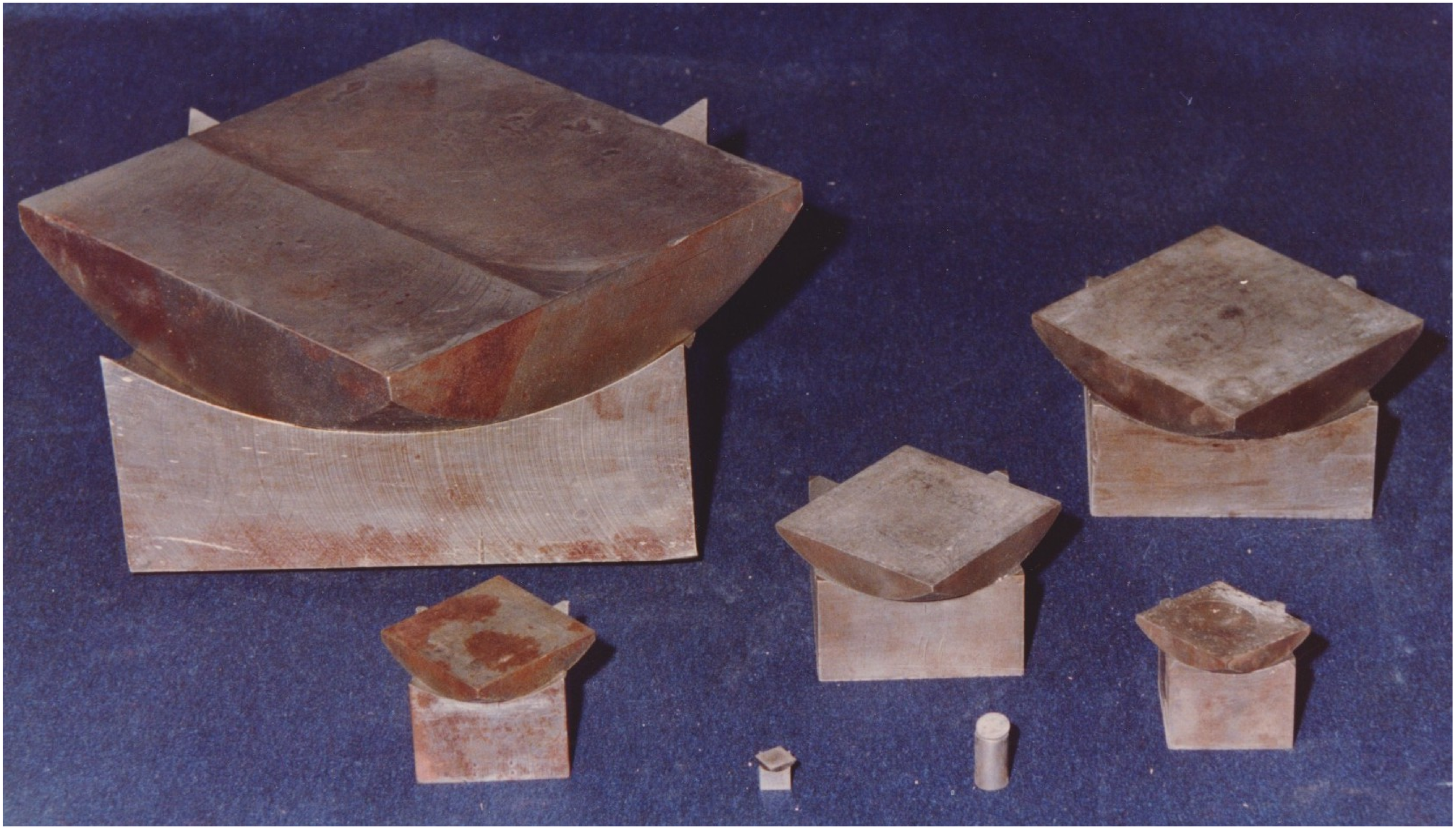
A próbatesteken végzett nyomószilárdság-vizsgálatok során megállapítottuk, hogy a jelenlegi vizsgálati gyakorlat nem biztosítja a geometriai feltételek azonosságát. Javasoljuk, hogy a nyomószilárdság-vizsgálatok során azonos gömbcsuklót és azonos nyomólapokat alkalmazzunk úgy, hogy a gömbcsukló mindig azonosan viszonyuljon a vizsgálandó próbatesthez.

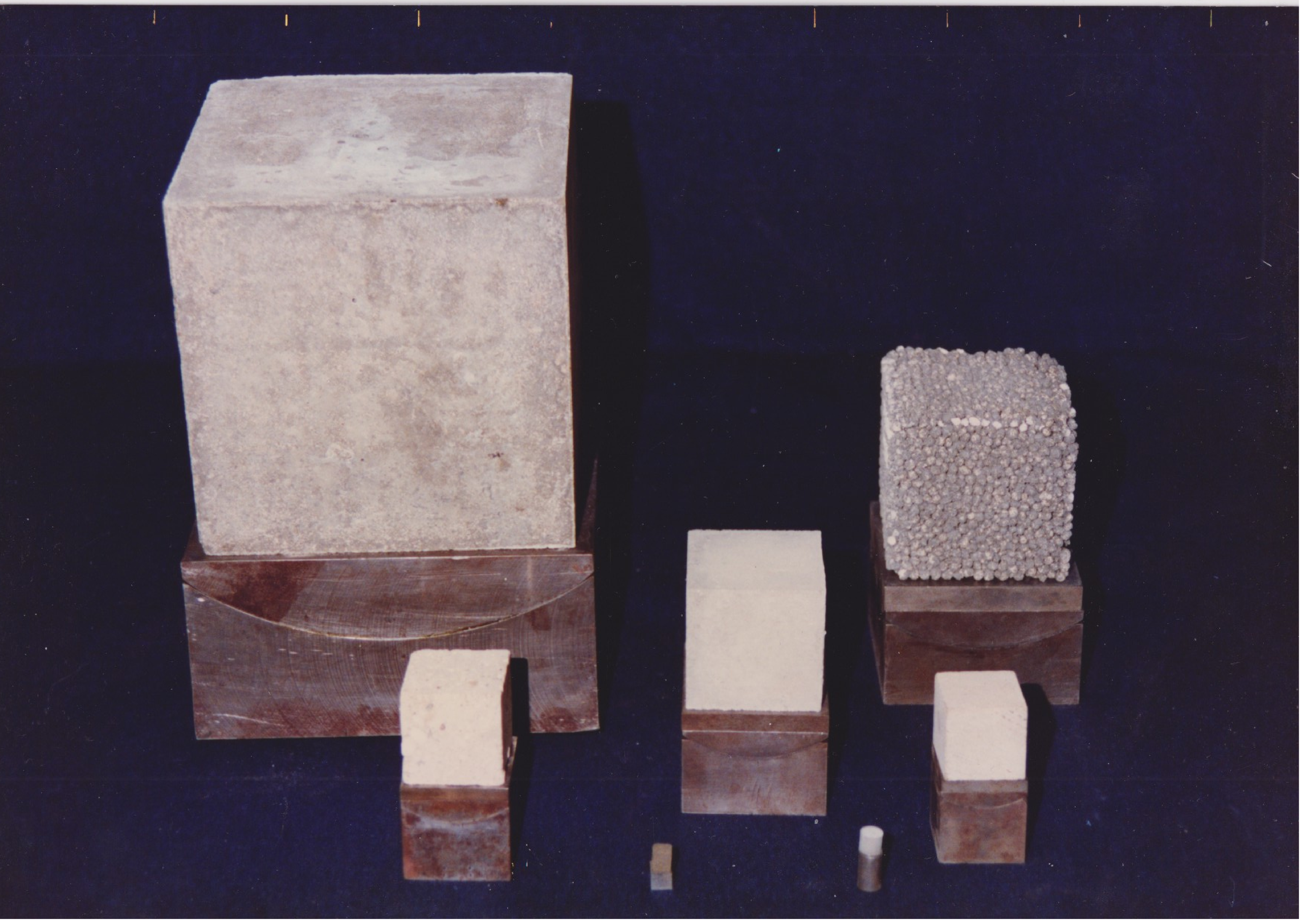
Gyakorlatilag a gömbcsukló és a nyomólapok ne az anyagvizsgáló gép tartozékai, hanem a vizsgálati próbatest szerves tartozékai legyenek.

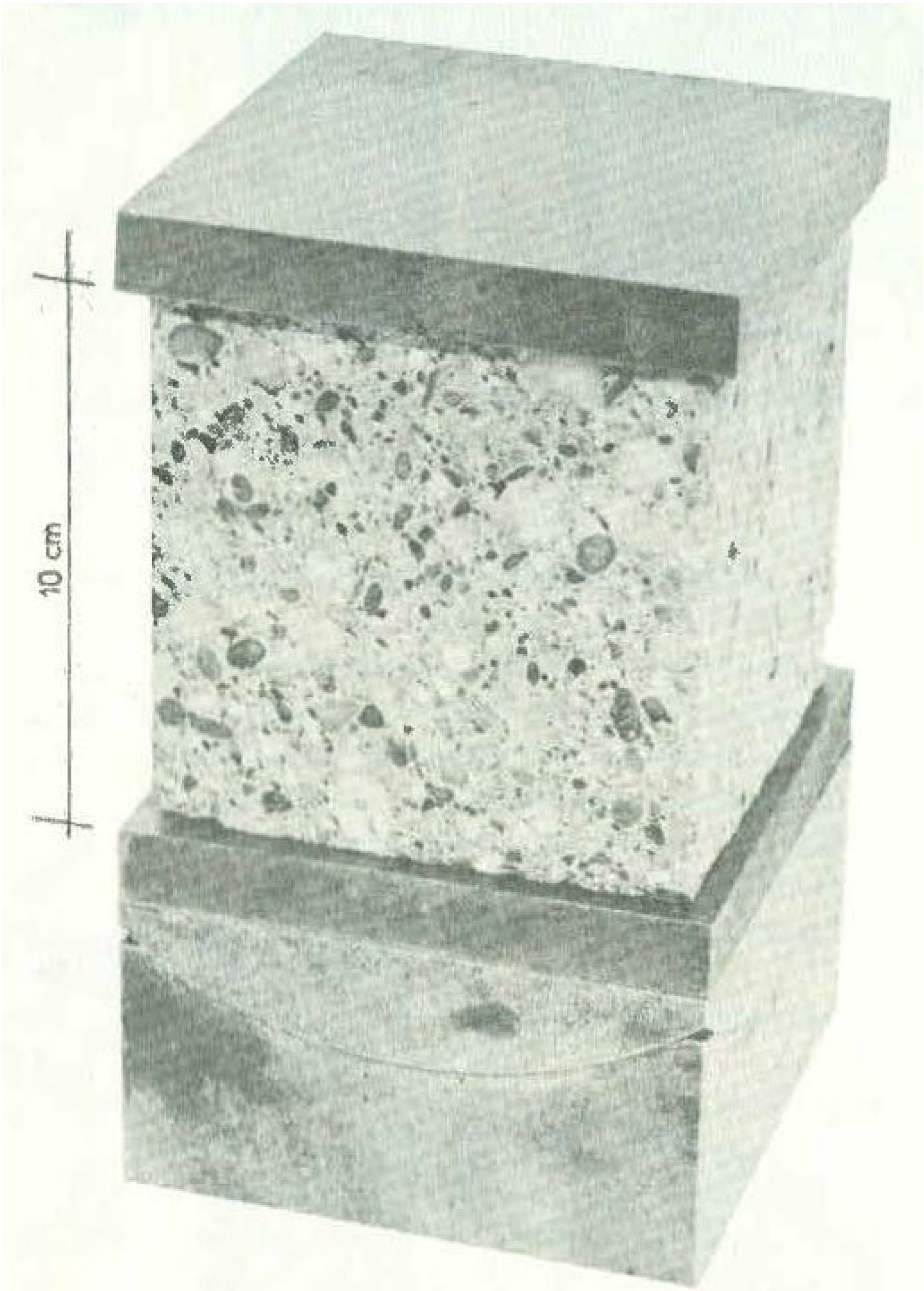
Néhány kocka próbatestet mutatunk be, a neki megfelelő nyomólapra és gömbcsuklóra elhelyezve a *24. ábrán.* A *25. ábra* egy 100 mm élhosszúságú kockát, a *26.* és *27. ábra* pedig egy ⌀ 10 mm méretű henger alakú próbatestet mutat be a hozzá illesztett nyomólapon és csuklón elhelyezve, vizsgálati feltételek között.



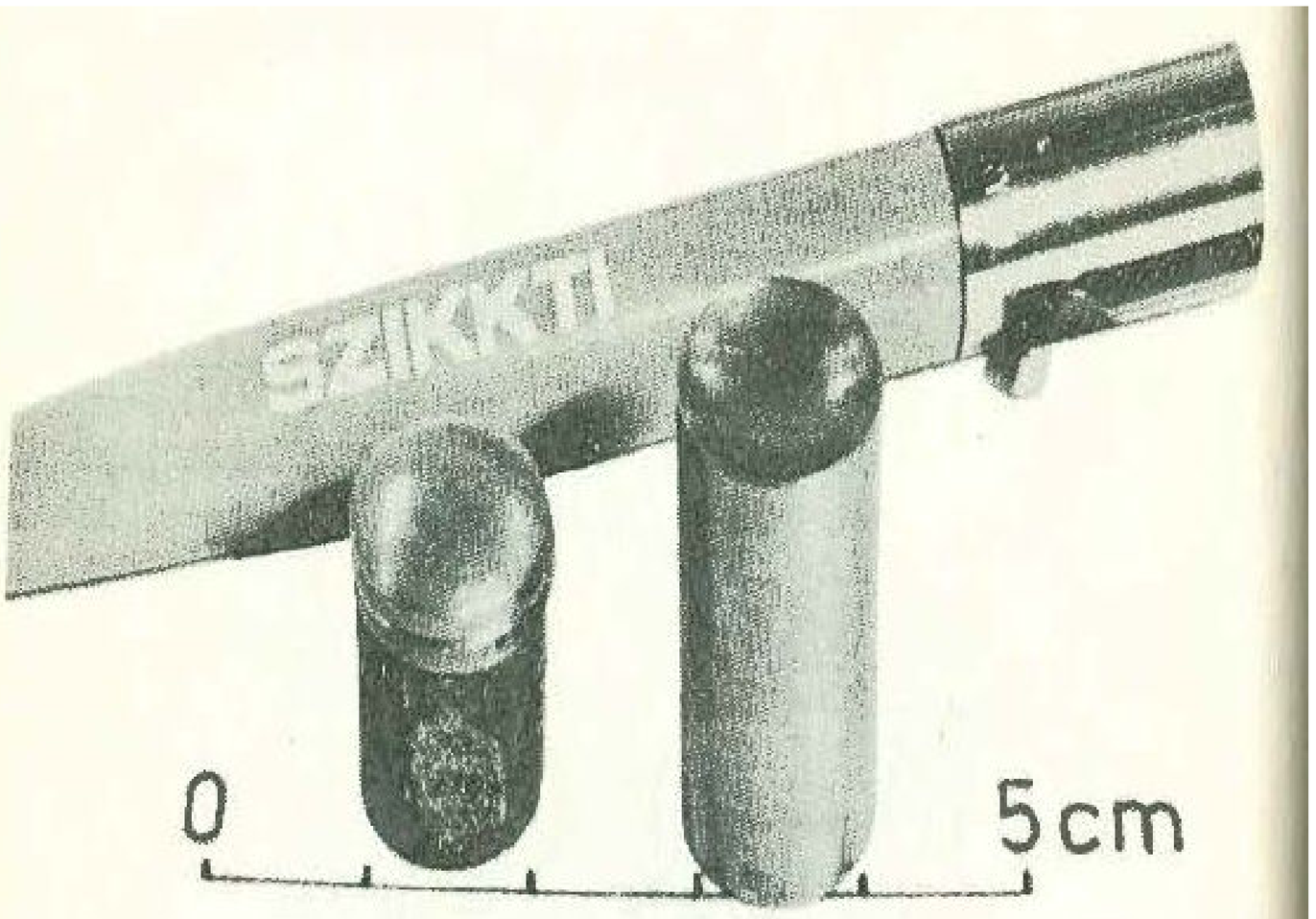
24. ábra



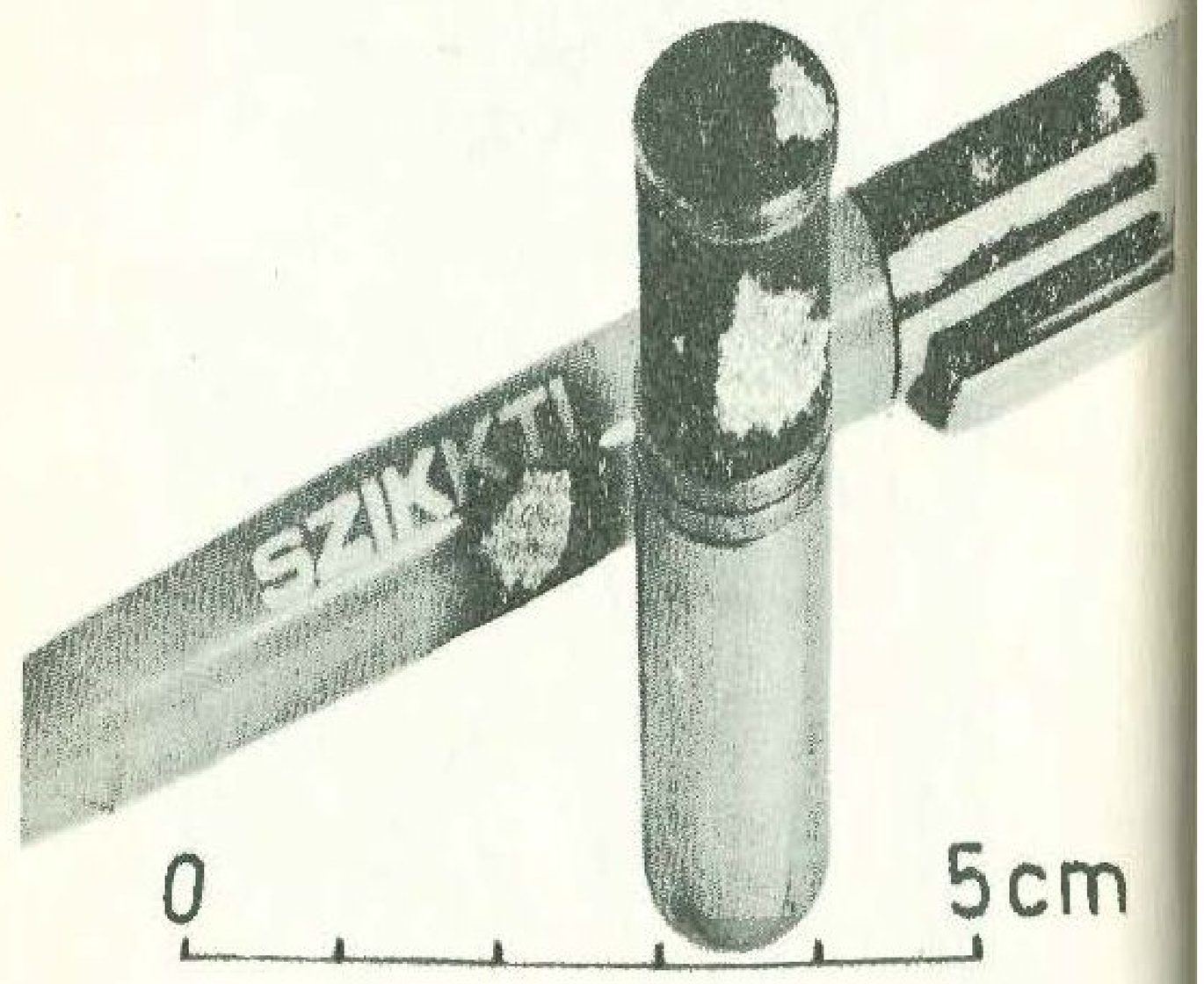




25. ábra



26. ábra



27. ábra

5. AZ ELMÉLETILEG ÉS KÍSÉRLETILEG MEGHATÁROZOTT FELTÉTELEK ALKALMAZÁSA IPARI KÍSÉRLETEK ÉS VIZSGÁLATOK SORÁN

Első példaként egy olyan vizsgálati tapasztalatot írunk le, mely részben inspirálója lett több éves ezirányú tevékenységünknek.

5.1 A mészkő nyomószilárdság-vizsgálata

Megbízás keretében siklósi tömött mészkő minták nyomószilárdságát kellett megvizsgálni. Az intézetünkbe beszállított tömbökből 50 mm élhosszúságú kocka próbatesteket vágtunk ki egy Hensel típusú gyémántszemcsés szerszámú körfűrésszel, melynek vágási sebessége 50 m/s. A gép vágási pontosságából adódóan az 50 mm élhosszúságú kocka szemben levő lapjai közötti max. eltérés nem haladta meg a 0,01 mm-t.
A gyémántszemcsés vágószerszám minőségéből következően a kivágott próbatest felülete „csiszolt" minőségű volt. Ily módon kivágtunk 12 db próbatestet és azt 105 °C-on kiszárítottuk.

A próbatestek nyomószilárdság-vizsgálatát egy 500 kN méréshatárú Schopper típusú univerzális anyagvizsgáló gépen kezdtük el.

A próbatesteket 500 kN értékig nyomtuk meg, de mivel nem mentek tönkre – 6 db-ot próbáltunk meg ezen a berendezésen vizsgálni – a vizsgálatot egy 1000 kN-os méréshatárú WPM 100 típusú gépen folytattuk.

A *23. táblázatban* ismertetjük a WPM 100 típusú univerzális anyagvizsgáló berendezésen kapott nyomószilárdság-vizsgálati eredményeket. Az első hat eredményt az 500 kN-os gépen már egyszer megnyomott próbatesteken kaptuk, a további hat próbatest még terheletlen volt.

Tekintve, hogy az első hat próbatest egyszer már 20,00 N/mm^2 feszültséget kibírt és ezek után a már terhelt próbatestek és a még terheletlen próbatestek egyaránt – nem jelentős eltéréssel – 12,0 N/mm^2 feszültségnél mentek tönkre, a vizsgálógépeket tettük vizsgálat tárgyává.

5. AZ ELMÉLETILEG ÉS KÍSÉRLETILEG MEGHATÁROZOTT FELTÉTELEK ALKALMAZÁSA IPARI KÍSÉRLETEK ÉS VIZSGÁLATOK SORÁN

Első példaként egy olyan vizsgálati tapasztalatot írunk le, mely részben inspirálója lett több éves ezirányú tevékenységünknek.

5.1 A mészkő nyomószilárdság-vizsgálata

Megbízás keretében siklósi tömött mészkő minták nyomószilárdságát kellett megvizsgálni. Az intézetünkbe beszállított tömbökből 50 mm élhosszúságú kocka próbatesteket vágtunk ki egy Hensel típusú gyémántszemcsés szerszámú körfűrésszel, melynek vágási sebessége 50 m/s. A gép vágási pontosságából adódóan az 50 mm élhosszúságú kocka szemben levő lapjai közötti max. eltérés nem haladta meg a 0,01 mm-t.
A gyémántszemcsés vágószerszám minőségéből következően a kivágott próbatest felülete „csiszolt" minőségű volt. Ily módon kivágtunk 12 db próbatestet és azt 105 °C-on kiszárítottuk.

A próbatestek nyomószilárdság-vizsgálatát egy 500 kN méréshatárú Schopper típusú univerzális anyagvizsgáló gépen kezdtük el.

A próbatesteket 500 kN értékig nyomtuk meg, de mivel nem mentek tönkre – 6 db-ot próbáltunk meg ezen a berendezésen vizsgálni – a vizsgálatot egy 1000 kN-os méréshatárú WPM 100 típusú gépen folytattuk.

A *23. táblázatban* ismertetjük a WPM 100 típusú univerzális anyagvizsgáló berendezésen kapott nyomószilárdság-vizsgálati eredményeket. Az első hat eredményt az 500 kN-os gépen már egyszer megnyomott próbatesteken kaptuk, a további hat próbatest még terheletlen volt.

Tekintve, hogy az első hat próbatest egyszer már 20,00 N/mm^2 feszültséget kibírt és ezek után a már terhelt próbatestek és a még terheletlen próbatestek egyaránt – nem jelentős eltéréssel – 12,0 N/mm^2 feszültségnél mentek tönkre, a vizsgálógépeket tettük vizsgálat tárgyává.

23. táblázat

Szilárdsági eredmények

Nyomószilárdság (N/mm²)	
egyenként	átlag
13,20 11,60 12,80 11,46 13,84 14,26 10,89 12,19 13,16 14,02 12,83 11,25	12,62

Mindkét berendezést újólag hitelesítettük és megállapíthattuk, hogy azok egyaránt hiteles értéket mutatnak. Tekintve, hogy a nyomólapokat a próbatesttel együtt vittük át a másik gépre, ezért tovább vizsgálva a feltételeket, csupán a gömbcsuklóban találtunk jelentős eltérést. Az 500 kN-os berendezésen egy 100 mm sugarú gömbcsuklót a 1000 kN-os berendezésen egy 200 mm sugarú gömbcsuklót találtunk. Számtalan hasonló vizsgálati eredmény és tapasztalat vezetett minket arra, hogy a nyomófejek (nyomólapok, gömbcsukló) nem géptartozékok, hanem a vizsgálati próbatestek méretétől függő, a vizsgálat szerves részei.

5.2 A csőbeton nyomószilárdság-vizsgálata

A továbbiakban egy nagyszilárdságú B40 N/mm² értékűre tervezett beton minőségének megítélése, vizsgálati feltételei okoztak jelentős – bizonyos értelemben általánosítható – problémát.

A beton tervezett összetételét a *24. táblázat* mutatja.

24. táblázat

B – 40 – 15/1

Cement	C 350	450 kg/m³	
Adalék	0-1 mm	38%	698 kg
	0-3 mm	17%	312 kg
	3-7 mm	9%	165 kg
	7-15 mm	36%	662 kg
	Adalék összesen:		1837 kg

tervezett sűrűség: 2387 kg/m³
V/c = 0,36

A tervezett betonból nagyméretű csöveket készítenek, melyeknek tényleges betonszilárdságát, ebből pedig a minősítő értékét kellett meghatározni.

Háromféle csőméret mellett három betonminőséget jelöltünk. A betonjelek számsorában az első számértékek – 1000-1250 és 1500 – a csőátmérőt jelölik.

Az első vizsgálatot egy WPM 100 típusú univerzális anyagvizsgáló gépen végeztük el és 100 cm^3 méretű, csőfalból kivágott kockán a következő eredményeket adta *(25., 26., 27. táblázat)*.

25. táblázat

A beton jele: Ø 1000. 74.08.29.

A beton nyomószilárdsága (N/mm^2)	
egyenként	átlag
51,2 49,5 61,0 55,0 38,6	51,1

$S = 8{,}25\ N/mm^2$ (16%)

A minősítő érték:

$$E_{min} = 51{,}1 - \frac{2}{0{,}867} \cdot 8{,}25 = 32{,}1\ N/mm^2$$, ez megfelel a B40-es betonminőségnek.

26. táblázat

A beton jele: Ø 1250 580 74.08.29

A beton nyomószilárdsága (N/mm^2)	
egyenként	átlag
29,8 55,5 35,2 52,0 39,0	42,3

$S = 11{,}0\ N/mm^2$ (26%)

A minősítő érték:

$$E_{min} = 42{,}3 - \frac{2}{0{,}867} \cdot 11{,}0 = 16{,}9\ N/mm^2$$, ez megfelel a B20-as betonminőségnek.

27. tábláz

A beton jele: Ø 1500 85 74.09.11

A beton nyomószilárdsága (N/mm²)	
egyenként	átlag
54,0 51,4 53,8 40,6 18,4	43,6

S = 15,1 N/mm² (34,6%)
A minősítő érték:

$$E_{min} = 43{,}6 - \frac{2}{0{,}867} \cdot 15{,}1 = 87{,}6 \text{ N/mm}^2$$, ez megfelel a B10-es betonminőségnek.

A beton összetétele alapján is látható volt, hogy az Ø 1250 és az Ø 1500-as csövek esetében a szilárdsági eredmények irreálisak. Az Ø 1000-es cső esetében a hiba mértéke nem feltűnő.

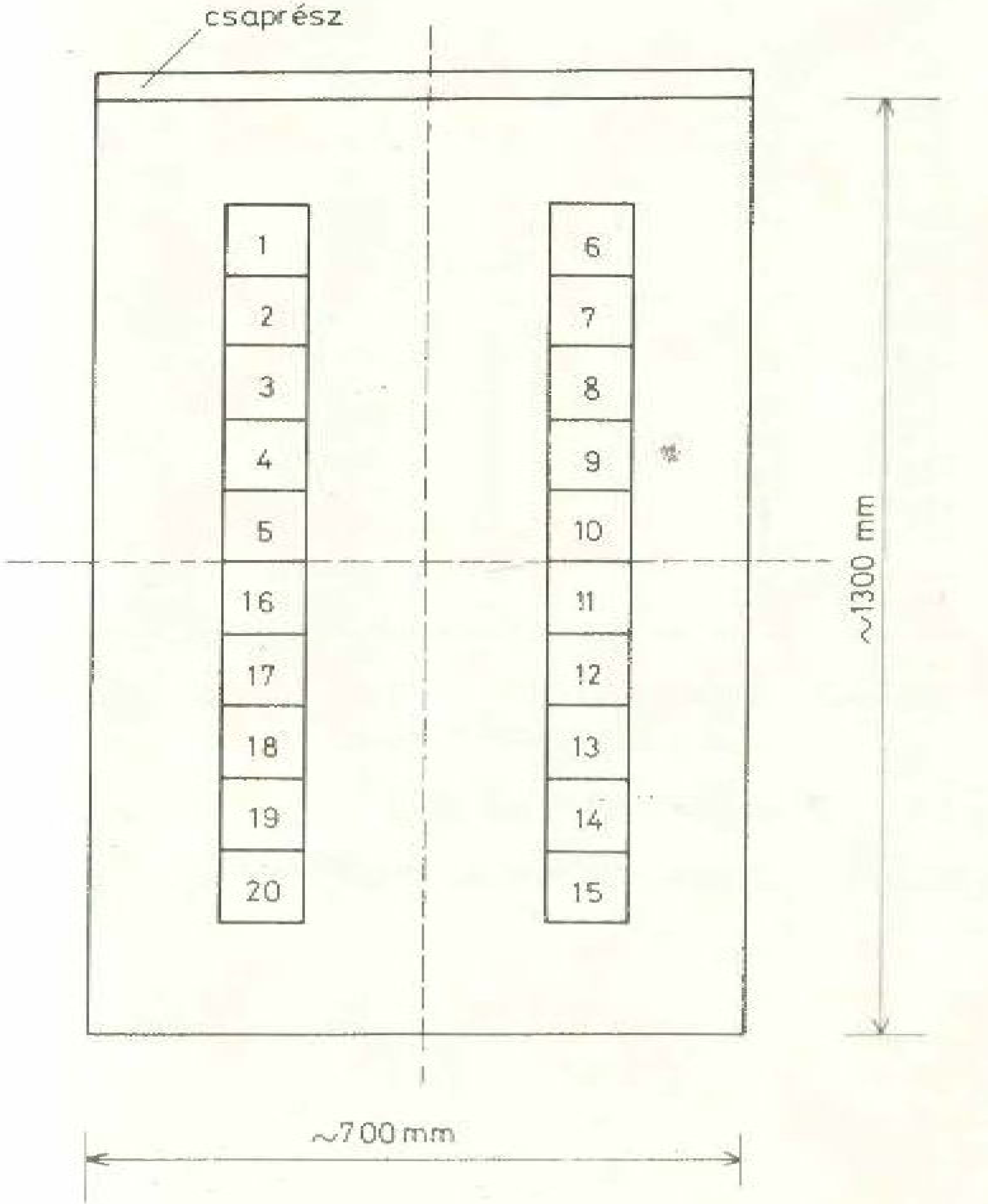
A beton minőségének megnyugtató meghatározására – e közleményben leírt vizsgálati feltételeket alkalmazva – az Ø 1250 és az Ø 1500-as csövek esetében megismételtük a vizsgálatot, ugyancsak WPM 100-as típusú univerzális anyagvizsgáló gépen. A mintákat ugyanazon csőből vágtuk ki.

A megszilárdult csőből – plazmavágó segítségével – csövenként 700 x 1300 mm méretű darabokat vágtunk ki, majd a *28. ábra* szerinti elrendezésben 10 cm³ méretű próbatesteket gyémántkörfűrész segítségével. Tekintve, hogy a beton kora már meghaladta a 28 napot, ezért az átlageredményeket 1,25-ös értékkel redukáltuk, és ennek alapján számítottuk a minősítő értéket is *(28., 29. táblázat)*.

Minden körülményt figyelembe véve a kétféle vizsgálat eredményei – ugyanazon betonból kivágott próbatesteken – nagyon jelentős eltérést mutatnak *(30. táblázat)*.

Ha figyelembe vesszük a beton összetételét a vizsgálat során mért térfogatsúlyokat és a vizsgálat során kapott relatív szórásértékeket (1. vizsgálat 26%, illetve 34,6%, 2. vizsgálat 5,52%, illetve 9,59%), meg kell állapítani, hogy a vizsgálati feltételeink alkalmazásával kaptuk a helyes és reális értéket.

Cső jele: 1250 580 74. 08. 29.
1500 85 74. 09. 11.



Az ϕ 1250-es cső jele: 580 1974. 08. 29.

Jel	Térfogatsúly (kN/m³)		Nyomószilárdság (N/mm²)	
	egyenként	átlag	egyenként	átlag
1	23,53		76,8	
2	23,71		69,8	
3	23,94		71,1	
4	23,70		66,2	
5	23,42		73,9	
6	23,83		74,5	
7	23,95		70,0	
8	23,91		71,7	
9	23,63		68,2	
10	23,73	23,78	76,1	72,5
11	23,51		77,7	
12	23,80		65,7	
13	23,77		71,9	
14	23,88		69,7	
15	23,88		66,7	
16	23,50		74,0	
17	24,09		78,8	
18	23,80		77,6	
19	23,74		76,4	
20	23,96		72,3	

$$K_{red.} = \frac{72,5}{1,25} = 58,0\ N/mm^2 \qquad S = 4,0\ N/mm^2$$

$$S_{red.} = 3,2\ N/mm^2$$

$$E_{min.} = \bar{K}_{red.} - \frac{\varphi}{V} \cdot s = 58 - \frac{2}{0,945} \cdot 3,2 = 51,2\ N/mm^2$$

A vizsgált csőbeton tehát a B40-15/1 minőségi előírásnak megfelel.

29. táblázat

Az ϕ 1500-as cső jele: 85 1974. 09. 11.

Jel	Térfogatsúly (kN/m³)		Nyomószilárdság (N/mm²)	
	egyenként	átlag	egyenként	átlag
1	23,22		70,0	
2	23,18		71,6	
3	23,32		72,0	
4	23,42		64,0	
5	23,13		61,0	
6	23,33		79,0	
7	23,18		82,0	
8	23,12		67,7	
9	23,27		81,0	
10	23,37	23,28	77,0	69,9
11	23,20		69,0	
12	23,18		65,7	
13	23,68		60,4	
14	23,49		63,7	
15	23,43		61,7	
16	23,23		65,5	
17	23,14		68,6	
18	23,35		68,0	
19	23,37		70,4	
20	23,01		79,4	

$$K_{red.} = \frac{69,9}{1,25} = 55,9\ N/mm^2 \qquad S = 6,7\ N/mm^2$$

$$S_{red.} = 5,4\ N/mm^2$$

$$E_{min} = K_{red.} - \frac{\varphi}{V} \cdot s = 55,9 - \frac{2}{0,945} \cdot 5,4 = 44,5\ N/mm^2$$

A vizsgált csőbeton tehát a B40-15/1 minőségi előírásnak megfelel.

30. táblázat

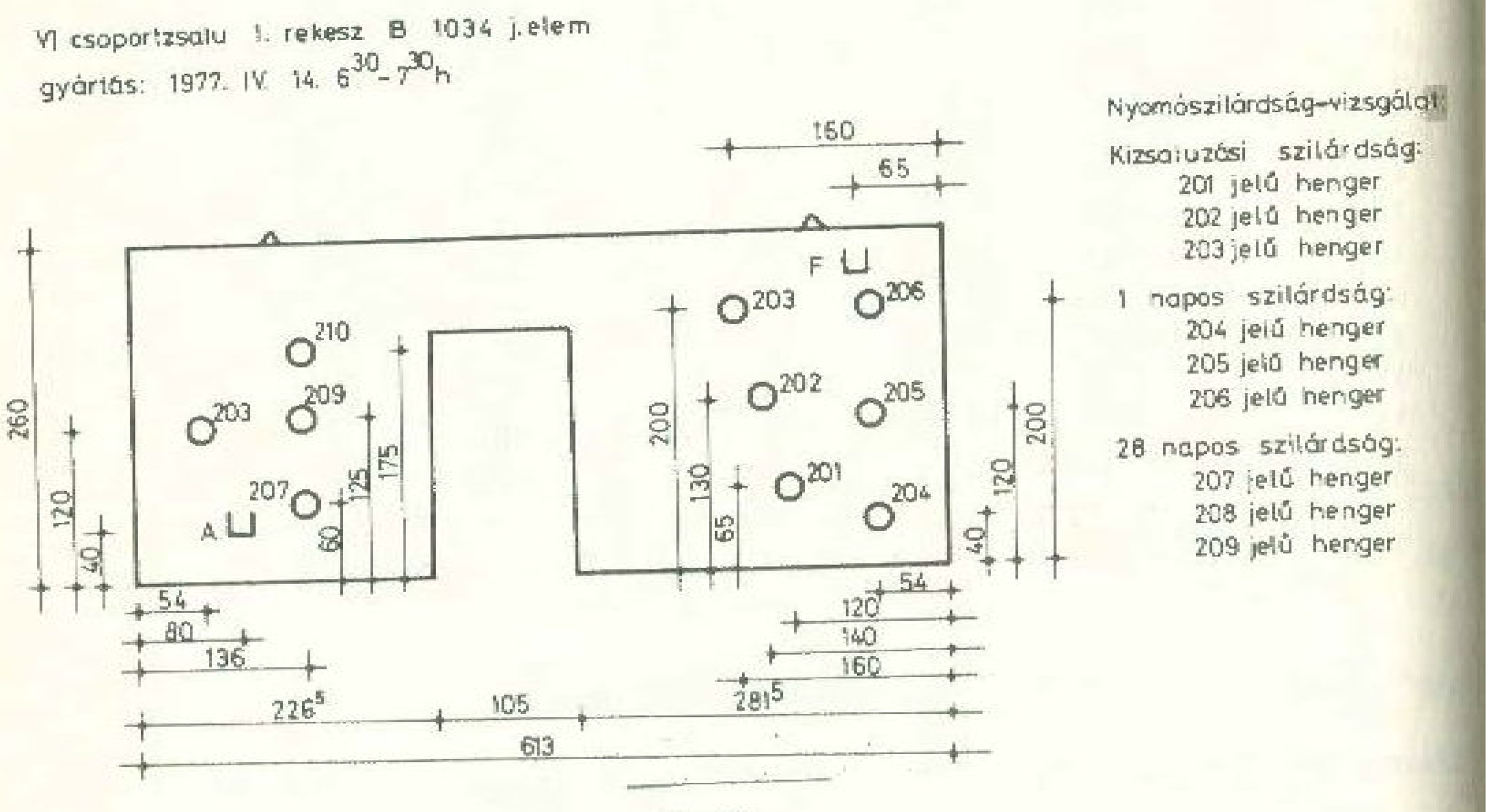
cső jele	1. vizsgálat	2. vizsgálat
1250 580 1974. 08. 29.	B 20	B 56
1500 85 1974. 09. 11.	B 10	B 56

5.3 Házgyári panelok szilárdságvizsgálata

Az ipari alkalmazás során harmadik példaként az 1. sz. Házgyárban a panelok beton szilárdságának vizsgálatakor tapasztaltakat írjuk le.

A csoportzsaluzatos technológiában érlelt panelok szilárdulási viszonyainak meg határozása volt a feladat. Ennek megfelelően – a panelok vasalását is figyelembe vé ve – jelölték ki az egyes mintavételi helyeket, ahonnan gyémántszerszámos magfúró berendezéssel Ø 150 mm méretű és 150 mm magasságú (a panelvastagsággal azonos) hengereket fúrtak ki. A kifúrt hengereken közvetlen hőérlelés után, egy és 28 napos korban nyomószilárdság-vizsgálatot hajtottak végre.

A mintavételek helyét mutatjuk be a *29. ábrán.*



29. ábra

Ennek megfelelően az alábbi betonösszetételt alkalmazták:

Cement:		410 kg/m^3,
Adalék:	0-8 mm	50%,
	8-15 mm	25%,
	15-20 mm	25%,
Össz:		1786 kg/m^3,
Víz:		205 kg/m^3,
V/C:		0,5.

A cement minősége: Váci 350 kspc 20.

A kifúrt magokon a nyomószilárdság-vizsgálat WPM 40-típusú univerzális anyagvizsgálógépen végezték. Ebből a vizsgálatból három panel próbatestjeinek eredményeit írjuk le, de a többi panelon kapott eredmények is azonos képet mutattak *(31., 32., 33. táblázat)*.

31. táblázat

IV. csoportzsalu 1. rekesz F 330/1. elem

A próbatest jele	A beton kora	Térf. súly (kN/m³)		Nyomószilárdság (N/mm²)	
		egyenként	átlag	egyenként	átlag
201	gőzölés	22,45		8,6	
202		23,30	22,90	8,2	7,7
203	után (8ó)	22,95		6,4	
204		23,40		10,0	
205	1 napos	23,50	23,60	6,4	8,8
206		23,90		10,0	
207		23,30		7,5	
208	28 napos	23,25	23,30	12,3	10,8
209		23,35		12,7	

32. táblázat

IV. csoportzsalu 4. rekesz F 331/4. elem

A próbatest jele	A beton kora	Térf. súly (kN/m³)		Nyomószilárdság (N/mm²)	
		egyenként	átlag	egyenként	átlag
201	gőzölés	22,75		6,4	
202		21,40	21,98	7,3	7,4
203	után (8 ó)	21,80		8,6	
204		22,80		10,0	
205	1 napos	22,80	23,15	9,3	8,9
206		23,85		7,5	
207		21,50		8,8	
208	28 napos	23,35	22,55	12,2	8,8
209		22,80		5,4	

33. tábláz

VI. csoportzsalu 1. rekesz 1034 j. elem

A próbatest jele	A beton kora	Térf. súly (kN/m³)		Nyomószilárdság (N/mm²)	
		egyenként	átlag	egyenként	átlag
201	gőzölés	23,70		18,3	
202		24,00	23,68	16,6	19,9
203	után (8 ó)	23,35		24,8	
204		23,60		19,7	
205	1 napos	23,15	23,20	26,4	23,7
206		22,85		25,0	
207		22,80		18,3	
208	28 napos	22,40	22,65	16,3	16,5
209		22,75		15,7	

A vizsgálati eredményekből látható, hogy a betonösszetételhez viszonyítottan nem ad reális értéket és ezen tényleges szilárdsági mérőszámok alapján a nevezett panelok alkalmazását le kellene állítani, mivel a kívánalmaknak nem tesznek eleget.
Vizsgálati feltételeinket alkalmazva – a házgyár megbízására – nevezett panelok szilárdságvizsgálatát elvégeztük és a *34., 35. táblázat* szerinti eredményeket kaptuk.

34. tábláz

VI. csoportzsalu 1. rekesz B 1034. j. elem

A próbatest jele	A beton kora	Térf. súly (kN/m³)		Nyomószilárdság (N/mm²)	
		egyenként	átlag	egyenként	átlag
201	gőzölés	23,40		11,5	
202		23,20	23,17	12,6	12,2
203	után (8 ó)	22,90		12,6	
204		22,90		13,2	
205	1 napos	23,30	22,90	13,5	14,3
206		22,50		15,9	
207		23,38		24,5	
208	28 napos	23,36	23,17	25,0	24,2
209		22,76		23,0	

35. táblázat

VI. csoportzsalu 8. rekesz B 516. j. elem

A próbatest jele	A beton kora	Térf. súly (kN/m³)		Nyomószilárdság (N/mm²)	
		egyenként	átlag	egyenként	átlag
201	gőzölés	23,10		13,4	
202		23,00	22,90	11,3	12,2
203	után (8 ó)	22,60		11,8	
204		23,40		15,1	
205	1 napos	23,30	23,30	15,4	14,6
206		23,20		13,3	
207		23,21		27,9	
208	28 napos	23,23	23,07	26,7	26,8
209		22,76		25,9	

A vizsgált összes panel hasonló képet mutatott és 28 napos korban kielégítette a B 28-30/15 jelű betonban megkívánt előírást. A közvetlen vizsgálati eredményeken túlmenően figyelemreméltó a második vizsgálat során kapott szórás mértéke ami 3,7% körül mozog, ez véleményünk szerint nagyon kedvező érték.

5.4 Korund próbatestek szilárdságvizsgálata

Kutatási feladataink során korund próbatestek nyomószilárdság-vizsgálatát kellett elvégezni. A próbatestek hengeres fomájúak voltak, mérete: Ø 6 mm, a henger magassága 10 mm. A próbatesteket WPM 40-típusú univerzális anyagvizsgáló gépen, az eredetileg megjevő feltételek mellett vizsgáltuk meg. Az eredményeket a *36. táblázat* mutatja.

36. táblázat

Jel	Testsűrűség (g/cm³)		Nyomószilárdság (N/mm²)	
	egyenként	átlag	egyenként	átlag
1	3,752		965,5	
2	3,835		897,0	
3	3,799	3,771	923,0	881,5
4	3,806		872,5	
5	3,722		774,0	
6	3,765		863,0	

S = 64,8 N/mm² (7%)

Az azonos minőségű további hat db korund próbatestet a megadott méretre tervezett gömbcsukló és nyomólap alkalmazásával vetettük nyomószilárdság-vizsgálat alá. Ilyen feltételek alapján a *37. táblázatban* látható eredményeket kaptuk.

37. táblázat

Jel	Testsűrűség (g/cm^3)		Nyomószilárdság (N/mm^2)	
	egyenként	átlag	egyenként	átlag
1	3,731		1 456	
2	3,831		1 573	
3	3,711	3,767	1 439	1 513
4	3,766		1 468	
5	3,805		1 584	
6	3,755		1 577	

$S = 68,5\ N/mm^2$ (5%)

A kétféle vizsgálat eredménye különlegesen figyelemre méltó, mert első sorban arra mutat rá, hogy nagyszilárdságú, rideg anyagok esetén a vizsgálati feltételek különbözősége nagyon jelentős eltéréseket okoz.

A vizsgálati gyakorlatból kiemelt négy példával csupán érzékeltetni kívántuk a helyzet komolyságát és igazolást szerezni arra, hogy a vizsgálati módszerek javítására irányuló törekvéseink a gyakorlatban is eredményre vezettek. Természetesen nemcsak e néhány eredmény áll rendelkezésünkre, de a kiadvány témája és célja nem indokolja, hogy a vizsgálati gyakorlat ellentmondásos helyzetéből származó eseteket nagyobb mértékben – terjengősebben – soroljuk fel.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A közleményben, címének és céljának megfelelően az építőanyagok nyomószilárdságának elméleti kérdéseivel, valamint a nyomószilárdság vizsgálati problémáival foglalkozunk.

A már régóta ismert és megszokott építőanyagoknak (cement, beton, kerámia, üveg) gyártási technológiáik fejlődése következtében jelentősen változnak a szilárdsági- és ezen belül a rugalmassági tulajdonságai. Új építőanyagok – elsősorban a műanyagok – egészen újszerű vizsgálati problémákat vetettek fel. Ez a kétféle tendencia egyre fokozottabban mutat rá a nyomószilárdság meghatározásának elméleti hiányosságaira és a vizsgálati feltételek még megoldatlan problémáira.

Elméleti megfontolásaink és kutatásaink szerint az építőanyagok szilárdságának egységes meghatározására csak olyan feltétellel lehetséges, melyet az alábbi meghatározásban foglalunk össze:

Az anyagban levő feszültségi állapot értéke függ a feszültségi állapot eléréséhez szükséges fajlagos teljesítmény értékétől, ezért két feszültségi állapot akkor – és csak akkor – tekinthető egyenértékűnek, ha a **feszültségi állapot eléréséhez tartozó teljes fajlagos – térfogatra vonatkoztatott – teljesítmény azonos.**

A megfogalmazásunk szerinti meghatározást mint feltételt ki kell elégíteni ahhoz, hogy az anyagok nyomószilárdságának meghatározott értékei egy és azonos feszültségi rendszerbe kerüljenek, ellenkező esetben azonos számértékekhez nem azonos anyagtulajdonság tartozik. Ezen anyagszilárdsági elméleti feltételen túlmenően, mint ismeretes a végesméretű elem – próbatest – geometriai formája, a geometriai forma és a vizsgálóberendezés viszonya is jelentősen befolyásolja az anyag szilárdságának értékét.

Jelen munkánkban a próbatest geometriai problémáival a próbatest méretének, geometriájának meghatározásával, a vizsgálati geometriai viszonyok „azonosra állításával" foglalkoztunk.

Ennek során összefüggéseket határoztunk meg a kocka és henger formájú próbatestekre és gyakorlatilag homogén anyagot alkalmazva vizsgálati anyagnak, tulajdonképpen a vizsgálati módszert vizsgáltuk.

A próbatestek méretének és az egyes – azonos geometrián belüli – méretváltozásoknak a mért szilárdsági értékre való hatását vizsgáltuk. Ezeket az összefüggéseket nagyszámú – mintegy 1000 – mérés alapján határoztuk meg. Az így kapott kép jelentősen eltér a hazai és nemzetközi irodalom adataitól, tendenciájában más jelleget mutat.

Ezen elméleti és laboratóriumi kutatás eredményeit ipari vizsgálati gyakorlatban alkalmaztuk és ennek – szerintünk – bizonyító, illetve megerősítő hatása érzékelhető a tanulmányunkban ismertetett példákból.

Az elméleti megfontolásainkat, laboratóriumi és ipari vizsgálati eredményeinket teszszük közzé jelen tanulmányunkban abban a reményben, hogy az építőanyagok nyomószilárdságának jobb meghatározásához hozzá tudtunk járulni.

SUMMARY

József DOMBI

Strength and strength-testing of building materials

In the present paper – according to it's title and aim – the theoretical problems of the strength of building materials as well as the problems of testing the compressive strength of them are dealt with.

The strength – and within this the elasticity-properties of the since long-known and accustomed building materials as cement, concrete, ceramics and glass changed a lot due to the development of their production technologies. The new building materials – first of all the plastics – raised novel testing problems. These two tendencies more and more show the theoretical insufficiencies of the determination of the compressive strength, and the unsolved problems of test conditions.

According to our theoretical considerations and research work the uniform determination of the strength of building materials is possible only by satisfying a precondition formulated as follows:

The value of the stress state in the material is depending on the specific performance necessary for reaching this stress state and thus two states of stress can be then – and only then – considered to be equivalent when the total specific performances (referred to volume) that belong to the reaching these states are equal.

The definition in our formulation as a condition must be satisfied to take the determined values of the compressive strength of materials into the same stress system, otherwise the material properties which belong to identical numerical values, are not the same. Over and above this theoretical condition of material strength, as it is known, the geometrical shape of a finite-size element – specimen – and the relation of the geometrical shape as well as the testing equipment significantly influence the resulting strength value of the material.

In the present work the geometrical problems, the determination of the size and geometry of the specimens as well as the „adjustment to equal" of the geometrical relations were dealt with.

In the course of this work relationships were determined for cubic and cylindrical specimens and using practically homogenous material as test material really the testing method was investigated.

The effect of the size of specimens and that of the size changes within the same geometry upon the measured strength values was investigated. These relationships were determined on the base of numerous – about 1000 – measurements. The thus resulting image largely differs from the data of the home and international literature having a different character in it's tendency.

The results of this theoretical and laboratory research were applied in the industrial testing practice and the proving and corroborating effect of this – in our view – can be seen from the examples shown in our paper.

In our present work our theoretical considerations as well as laboratory and industrial testing results are published with the hope that we contribute to the more sufficient determination of the compressive strength of building materials.

ZUSAMMENFASSUNG

József DOMBI

Festigkeit und Festigkeitsprobe von Baustoffen. I. Druckfestigkeit

Die vorliegende Publikation beschäftigt sich gemäss Titel mit den theoretischen Fragen der Druckfestigkeit von Baustoffen, sowie mit den Problemen der Druckfestigkeitsprüfung.

Zufolge der Entwicklung der Fertigungstechnologien von den altbekannten, herkömmlichen Baustoffen – Zement, Beton, Keramik, Glas – haben sich die Festigkeits- und – innerhalb dieser – die Elastizitätseigenschaften derselben wesentlich geändert.

Infolge der neuen Baustoffe – in erster Linie der Kunststoffe – ergaben sich neuartige Prüfungsprobleme. Diese zweierlei Tendenzen weisen immer mehr auf die theoretische Unvollständigkeit der Druckfestigkeitsbestimmung und auf die noch ungelösten Probleme der Prüfungsbedingungen hin.

Laut unserer theoretischen Erwägungen und Forschungen ist eine einheitliche Bestimmung der Baustoffestigkeit nur unter den nachstehend zusammengefassten Bedingungen möglich:

Der Wert des Spannungszustandes im Baustoff ist vom Wert der zur Erreichung des Spannungszustandes erforderlichen spezifischen Leistung abhängig, deshalb können zwei Spannungszustände nur dann für gleichwertig betrachtet werden, wenn die gesamte – auf den Rauminhalt bezogene – spezifische Leistung zur Erreichung des Spannungszustandes, gleich ist.

Die Bestimmung laut unserer Formulierung ist als Bedingung zu erfüllen, damit die für die Druckfestigkeit der Baustoffe bestimmten Werte in das gleiche Spannungssystem gelangen, anderenfalls gehören zu übereinstimmenden Zahlenwerten keine überwinstimmenden Baustoffeigenschaften.

Über diese theoretische Bedingung für Baustoffestigkeit hinaus beeinflussen bekanntlich bedeutend den Wert der Baustoffestigkeit auch die geometrische Form des Elementes/des Probekörpers von begrenztem Ausmass, sowie das Verhältnis zwischen der geometrischen Form und der Prüfeinrichtung.

In unserer vorliegenden Abhandlung befassten wir uns mit den geometrischen Problemen des Probekörpers, mit der Bestimmung der Abmessung und der Geometrie des Probekörpers, mit der Übereinstimmung der geometrischen Verhältnisse bei der Prüfung.

Dabei hatten wir Zusammenhänge zwischen den würfel- und walzenförmigen Probekörpern bestimmt und unter Anwendung eines praktisch homogenen Stoffes als Prüfstoff, eigentlich die Prüfungsmethode untersucht.

Es wurde die Wirkung der Probekörperabmessungen und der einzelnen Massabweichungen – innerhalb der gleichen Geometrie – auf die gemessenen Festigkeitswerte geprüft. Diese Zusammenhänge wurden aufgrund von zahlreichen – etwa 1000 – Messungen festgelegt. Das so erhaltene Bild zeigt wesentliche Abweichungen von den in- und ausländischen Literaturangaben und in seiner Tendenz ist es von ganz anderer Art.

Die Ergebnisse dieser theoretischen und Laboratoriumsforschungen wurden in der Prüfungspraxis der Industrie angewandt und die Beweis- bzw. Bekräftigungswirkung dieser Tatsache ist – unserer Meinung nach – an den Beispielen unserer Abhandlung wahrnehmbar.

In der vorliegenden Abhandlung werden unsere theoretischen Überlegungen, die Ergebnisse unserer Prüfungen im Laboratorium und in der Industrie in der Hoffnung veröffentlicht, zur besseren Bestimmung der Druckfestigkeit von Baustoffen beitragen zu können.

RÉSUMÉ

József DOMBI

La résistance mécanique des matériaux de construction et l'essai de la résistance. 1. Résistance à compression

Le rapport, — conformément à son titre et à son but — s'occupe avec les questions théoretiques de la résistance à la compression des matériaux de construction, ainsi qu'avec les problèmes de l'examen de la résistance à la compression.

Les résistances mécaniques — y compris les caractéristiques d'élasticité — en conséquence de l'évolution des technologies des matériaux de construction traditionnelles et connues depuis longtemps — c'est à dire le ciment, le béton, la céramique, le verre, — se changaient significativement. Les nouveaux matériaux de construction, en premier lieu les matières plastiques, ont révélé des problèmes d'essai tout à fait nouveaux. Ces deux tendances montrent de plus en plus fort les insuffisances théoriques de la détermination de la résistance à la compression, qui révèlent — au cours de la détermination de la résistance mécanique et aux conditions d'essai — des problèmes encore irrésolus.

Selon nos considérations théoriques et selon nos recherches, la détermination unifiée de la résistance mécanique des matériaux de construction est possible seulement par les conditions, pour lesquelles nous donnons la détermination ci-dessous:

La valeur de l'état de contraintes dans le matériau dépend de la valeur nécessaire pour obtenir le rendement spécifique, ainsi que deux états de contraintes peuvent être considérés et seulement alors, équivalent, si le rendement spécifique rapporté au volume spécifique total nécessaire àl'obtention de l'état de contraintes, est identique.

Pour que les valeurs de la résistance à la compression des matériaux déterminés se rangent dans un système de résistance, analogue — il faut que la détermination, selon notre formulation comme condition, — soit rempli; au cas contraire, aux valeurs numériques analogues, appartiennent des propriétés de matériau — différentes.

En dépassant cette condition théoretique de résistance de matériau, comme c'est notoire, – la forme géométrique de l'élément de dimension limité – l'éprouvette –, les relations entre sa forme géométrique, et l'installation d'essai, influent aussi notablement la valeur de la résistance du matériau.

Dans notre présent travail, nous nous occupons des problèmes géométriques de l'éprouvette, de la détermination de la taille et de géométrie des éprouvettes, ainsi qu'avec la „mise en place identique" des conditions géométriques de l'essai.

Au cours des recherches, nous avons déterminé des relations concernant des éprouvettes de forme cubique ou cylindrique et en employant comme matériau d'essai, un matière pratiquement homogène, nous avons étudié, proprement dit, la méthode d'essai.

Nous avons fait l'examen de l'influence des dimensions des éprouvettes et – entre géométrie analogue – de certaines variations de mesure, sur les valeurs de la résistance.

Ces relations étaient déterminées par de nombreuses – à peu près 1000 mesures.

L'aspect ainsi obtenu diffère significativement des données de la littérature nationale et internationale, il montre en ses tendances un autre caractère.

Les résultats des recherches théoretiques et effectuées au laboratoire ont été employés dans la pratique aux essais industriels, selon notre avis, leur influence est prouvée, c'est-à-dire confirmative et en partant de nos exemples exposés dans notre étude, sont perceptibles.

Nous publions dans cette étude nos résultats d'essai de laboratoire et industriels en espérant de pouvoir ainsi contribuer à la meilleure détermination de la résistance à la compression des matériaux de construction.

РЕЗЮМЕ

Домби Йожеф

Прочность строительных материалов и испытание их на прочность.

I. Прочность на сжатие

В публикуемой нами статье соответственно ее заглавию и назначению мы занимаемся теоретическими вопросами прочности на сжатие строительных материалов, а также проблемами испытания их прочности на сжатие. Свойства прочности и вместе с тем свойства упругости уже издавна знакомых и обычных для нас материалов – цемента, бетона, стекла, керамических материалов – в значительной мере изменяются в результате развития технологии их производства. Существование новых строительных материалов, в первую очередь, искусственных материалов создало совершенно новые проблемы, связанные с испытанием строительных материалов, Эти две тенденции все в большой мере доказывают, что в области определения прочности на сжатие имеются теоретические недоработки, а также неразрешенные проблемы условий испытания.

Согласно нашим теоретическим разработкам и исследованиям по вопросу единого определения прочности строительных материалов, это единое определение возможно только при условии, которое мы сформулировали следующим образом:

Величина напряженности материала зависит от величины удельной мощности, потребной для создания напряженности, поэтому два сравниваемых состояния напряженности тогда и только в том случае могут рассматриваться равными по величине, если равны удельные мощности, отнесенные к объему, потребные для достижения состояния напряженности.

Согласно нашей формулировке определение, как условие должно быть выполнено для того, чтобы определенные величины прочности материалов, на сжатие попали в одну и ту же, одинаковую систему напряженности, так как в противнам случае одним и тем же численным величивнам соответствуют различ-

ные свойства материала. Кроме этого теоретического условия прочности строительных материалов, как уже известно, на величину прочности большое влияние имеет геометрическая форма материала, взаимосвязь геометрической формы и испытательного оборудования элемента, имеющего ограниченные размеры, т. е. образца испытуемого материала.

В настоящей работе мы занимались вопросами геометрии образца, определением его розмера, геометрического определения „установкой равных" испытательных геометрических отношений.

В процессе этого мы определили зависимости для кубической и цилиндрической формы образцов и, применяя практически гомогенный материал в качестве испытательного материала, одновременно исследовали сам способ испытания.

Исследовали влияние изменения величины образца и некоторых размеров – при одной и той же геометрии – на величину измеряемой прочности. Эти зависимости были определены на основе многочисленных измерений, число которых равно приблизительно 1000. Полученные таким образом материалы в значительной мере отличаются по своим данным от данных, имеющихся в отечественной и международной технической литературе, и по своей тенденции носят совершенно иной характер.

Эти теоретические и лабораторные результаты исследования были использованы нами в практике промышленных испытаний, и примеры, изложенные в нашей статье, по нашему мнению ощутимо подтверждают наше доказательство.

Наши теоретические выводы, результаты лабораторных и промышленных исследований мы опубликовываем в настоящей статье в надежде на то, что этим мы сделаем вклад в дело вопроса более точного определения прочности на сжатие строительных материалов.

7. IRODALOMJEGYZÉK

[1] CSONKA P.: Statika I-II. k. Bp. Tankönyvkiadó, 1951.

[2] CSONKA P.: Statika példatár. Bp. Műszaki K. 1972.

[3] PALOTÁS L.: Építőanyagok I-II. Bp. Akadémiai K. 1959/61.

[4] PALOTÁS L.: A vasbeton elmélete. Bp. Akadémiai K. 1973.

[5] PALOTÁS L.: Mérnöki kézikönyv I. k. Bp. Műszaki K. 1955.

[6] KALISZKY S.: Képlékenységtan. Bp. Tankönyvkiadó, 1967.

[7] GOMBÁS P.: Fizika mérnökök számára. Bp. Akadémiai K. 1971.

[8] BÖLCSKEI E. — DULÁCSKA E.: Statikusok könyve. Bp. Műszaki K. 1974.

[9] TALABÉR J.: Cementipari kézikönyv. Bp. Műszaki K. 1966.

[10] DOMBI J.: Acélszál-erősítésű nagyátmérőjű Siome betoncsövek teherbírása. Bp. SZIKKTI, 1976.

Felelős kiadó: Dr. Talabér József, a Szilikátipari Központi Kutató és Tervező Intézet igazgatója. Készült az Építésügyi Tájékoztatási Központ Nyomdaüzemében (781114). Budapest, 1979. Felelős vezető: Raffay Rusztem Szerkesztő: Lengyel Péterné. Műszaki szerkesztő: Somogyi László. Azonossági szám: 339/78. KF eng. száma: 47331. Megjelent B/5 alakban, 8,8 A/5 ív terjedelemben, 600 példányban

NSTRON